

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VÝROBA KOLÍKOVÉ KONCOVKY OBJEMOVÝM
TVÁŘENÍM**

PRODUCTION OF TERMINAL PIN BY COLD FORMING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Šuranský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Forejt, CSc.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|--------------------------------------|
| Ústav: | Ústav strojírenské technologie |
| Student: | Bc. David Šuranský |
| Studijní program: | Strojní inženýrství |
| Studijní obor: | Strojírenská technologie |
| Vedoucí práce: | prof. Ing. Milan Forejt, CSc. |
| Akademický rok: | 2016/17 |

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výroba kolíkové koncovky objemovým tvářením

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh technologie velkosériové výroby kolíkové koncovky víka rozdělovače z mědi dle ČSN 42 3001.1, objemovým tvářením za studena s důrazem na operace protlačování.

Cíle diplomové práce:

- Vypracujte literární studii se zaměřením na objemové tvářením za studena.
- Zhodnoťte současný stav výroby součástí obdobného tvaru.
- Navrhněte vlastní technologii výroby se zaměřením na varianty a jejich hodnocení.
- Vypracujte výkresovou dokumentaci postupového nástroje.
- Zpracujte technické a ekonomické hodnocení.

Seznam doporučené literatury:

LANGE, Kurt, et al. Handbook of metal forming. Kurt Lange. 1st edition. New York : McGraw-Hill Book Company, 1985. 1156 s. ISBN 0-07-036285-8.

ELFMARK, Jiří, et al. Tvářením kovů. Ing.Pavel Vávra. 1. vyd. Praha : SNTL, 1992. 524 s. Technický průvodce; sv. 62. ISBN 80-03-00651-1.

MIELNIK, Edward M. Metalworking science and Engineering. Michael B. Bever. 1st edition. New York : McGraw-Hill, Inc., 1991. 976 s. ISBN 0-07-041904-3.

FOREJT, Milan, PÍŠKA, Miroslav. Teorie obrábění, tvářením a nástroje. Milan Forejt; Design obálky: Ildikó Putzová. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2006. 226 s. ISBN 80-214-2374-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

ŠURANSKÝ David: Výroba kolíkové koncovky objemovým tvářením

Práce prezentuje návrh technologie výroby kolíkové koncovky, která je vyrobená z elektrovedné mědi podle ČSN 42 3001.1 a nachází se v rozdělovači spalovacího motoru v sérii 320 000 ks. Na základě literární studie byly vypracovány 3 návrhy technologického postupu, přičemž dva z nich dbali na nízký počet operací a třetí, najoptimálnější varianta, byla navržena tak, aby bylo přetváření a mechanické vlastnosti v celém objemu rovnoměrné. Pro třetí variantu byly spočítány přetvářecí síly a práce, přičemž přetvářecí odpor byl určený podle modelu Johnson-Cook. Celková přetvářecí síla vyšla 64,5 kN a přetvářecí práce 189 J. Následně byla vypracována výkresová dokumentace přetlačníku a přetlačnice pro dopředné přetlačení dříku a zástavbový výkres pracovního prostoru stroje Šmeral TPM 5, který byl zvolený pro výrobu. Ekonomické hodnocení ukázalo náklady na jednu součást 0,09 Eur a rovnovážný bod, za kterým je výroba zisková leží za hranicí 177 000 vyrobených součástí.

Klíčové slova: měď ČSN 42 3001, tvárnění, přetváření, deformační odpor, přetlačování

ABSTRACT

ŠURANSKÝ David: Production of terminal pin by cold forming

The thesis presents a manufacturing technology proposition for a terminal pin made of copper according to ČSN 42 3001.1 located in combustion engine distributor in a series of 320 000 pcs. Based on a literature study, 3 versions of operation sequence were proposed, 2 of them with concern for lowest number of operations possible and the third, chosen one, was designed so the strain and therefore mechanical properties were equal in whole volume of final part. Forming force and work were calculated, utilizing the Johnson-Cook material model. Overall calculated forming force was 64,5 kN and total work for one part 189 J. Subsequently technical drawings of die and punch for the second operation of forward extrusion of shaft were processed along with workspace assembly drawing for the Šmeral TPM 5 machine, which was chosen for the fabrication. Economic evaluation set the costs for one part manufactured 0,09 Eur and equilibrium point, after which the production generates profit, located at 170 000 pcs produced.

Keywords: copper ČSN 42 3001, forming, strain, deformation stress, extrusion

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ŠURANSKÝ David. *Výroba kolíkové koncovky objemovým tvářením*. Brno, 2017. 63s, 4 výkresy, 3 přílohy, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor Strojírenská technologie. Vedúci práce prof. Ing. Milan Forejt, CSc.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Týmto prehlasujem, že predkladanú diplomovú prácu som vypracoval samostatne, s využitím uvedenej literatúry a podkladov, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho diplomovej práce.

V Leviciach dňa 25.05.2017

.....
Podpis

POĎAKOVANIE

Týmto ďakujem pánovi prof. Ing. Milanovi Forejtovi, CSc. za cené rady a zdroje týkajúce sa diplomovej práce a ochotu počas celej doby jej vypracovania.

OBSAH

Zadanie

Abstrakt

Bibliografická citácie

Čestné prehlásenie

PodĎakovanie

Obsah

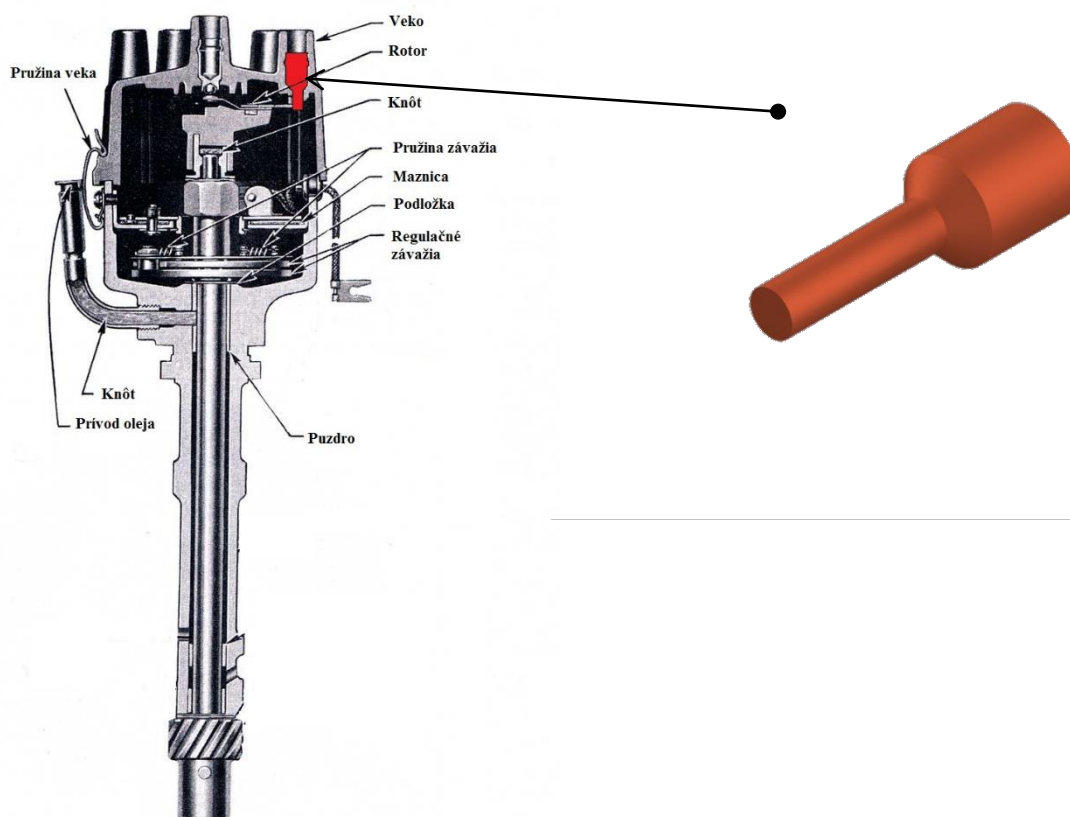
| | |
|---|-----------|
| ÚVOD | 9 |
| 1 TECHNOLOGIA OBJEMOVÉHO TVÁRNEŇA ZA STUDENA | 10 |
| 1.1 Technologické pochody objemového tvárneŇa za studena | 10 |
| 1.2 Termomechanické podmienky tvárneŇa | 15 |
| 1.3 Prirodzený pretvárný odpor a krivky spevnenia | 17 |
| 1.4 Tok materiálu pri pretlačovaní | 19 |
| 1.5 Polotovary vhodné pre pretlačovanie | 22 |
| 1.6 Nástroje pre objemové tvárneŇa za studena | 23 |
| 1.6.1 Dopredné pretlačovanie | 24 |
| 1.6.2 Spätné pretlačovanie | 26 |
| 1.7 Vzťahy pre určenie rýchlosti deformácie v konkrétných operáciách | 29 |
| 2 ROZBOR VYRÁBANEJ SÚČASTI | 32 |
| 2.1 Materiál podľa ČSN 42 3001.1 | 33 |
| 3 VOLBA TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU | 36 |
| 3.1 Varianta 1 - polotovar s priemerom hlavy kolíku | 36 |
| 3.2 Varianta 2 – polotovar s priemerom drieku kolíku | 38 |
| 3.3 Varianta 3 – optimalizovaný priemer polotovaru pre rovnomerné pretvorenie | 39 |
| 3.4 Zhodnotenie a výber najvhodnejšej varianty | 41 |
| 3.5 Výpočet pretvárnej sily a práce | 43 |
| 3.5.1 Výpočet pretvárnej sily v 1.operácii | 44 |
| 3.5.2 Výpočet pretvárnej sily v 2.operácii | 47 |
| 3.5.3 Výpočet pretvárnej sily v 3. operácii | 50 |
| 3.5.4 Výpočet pretvárnej sily v 4.operácii | 52 |
| 3.6 Volba stroja a nástrojov | 55 |
| 3.6.1 Výpočet radiálneho tlaku v prietlačnici 2. operácie | 56 |
| 4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOTENIE | 58 |
| 5 ZÁVER | 63 |
| Zoznam použitej literatúry | |
| Zoznam skratiek | |
| Zoznam príloh | |
| Zoznam výkresov | |

ÚVOD [1]

Technológia tvárnenia je významným odvetvím strojárkej výroby a poskytuje značné výhody v porovnaní s ostatnými technológiami. Uplatnenie nachádza takmer výhradne vo vysoko sériovej a hromadnej výrobe kde vysokú počiatočnú cenu strojného a nástrojového vybavenia vyvažujú úspory materiálové a časové. Tieto úspory sú ďalej umocnené rozsiahlou mechanizáciou a automatizáciou. Najvyšších úspor je možné dosiahnuť práve objemovým tvárnením za studena, kedy častokrát odpadá potreba ďalšieho tepelného spracovania vďaka zvýšeniu mechanických vlastností počas procesu tvárnenia. Taktiež odpadový materiál je veľmi malý alebo nulový.

Tvárnením dokážeme vyrobiť širokú škálu výrobkov, pričom sa nemení iba tvar ale aj mechanické vlastnosti výrobku. Významnú časť výrobkov tvorí napríklad výroba spojovacieho materiálu, bezošvých rúr, drôtov, ocelových a neželezných konštrukčných profilov. Ďalšou nespornou výhodou je možnosť vyrábať presné diely, ktoré nieje ďalej potrebné dokončovať a to pri udržaní veľmi vysokej výrobnosti.

Automobilový priemysel ako jeden z veľmi významných odvetví strojárkeho priemyslu využíva objemové tvárnenie pri výrobe mnohých súčastí najmä vďaka vysokej výrobnosti, úspore nákladov a zvýšeným mechanickým vlastnostiam. Táto diplomová práca sa zaoberá výrobou kolíku rozdelovača, teda súčasti, ktorá je vyrábaná hromadne vo veľkých sériách, v tomto prípade 320 000 ks/rok.



Umiestnenie kolíku v rozdelovači motoru [21]

1 TECHNOLOGIA OBJEMOVÉHO TVÁRNENIA ZA STUDENA [1,3,4,]

Tvárnenie za studena znamená, že teplota polotovaru je po celý čas procesu udržiavaná pod teplotou rekryštalizácie. Charakteristickým sprievodným javom pre túto technológiu je deformačné spevnenie, najmä zvýšenie medze klzu a medze pevnosti. Ďalšie významné metalurgické vlastnosti sú zvýšenie únavovej medze vplyvom spevnenia, nepretržitý priebeh vlákien a priaznivé vnútorné pnutie v porovnaní s obrábaním. Výsledkom sú výrobky s vysokou rozmerovou presnosťou a kvalitou povrchu s minimálnymi alebo nulovými prídavkami na obrobenie. Príklady výrobkov objemového tvárnenia za studena sú zobrazené na obr.1.1. Typický postup výroby šróbu na postupovom viacoperačnom automate je na obr.1.2



Obr. 1.1 Ukážka produktov vyrábaných objemovým tvárnením za studena – pretlačovaním a ubíjaním [11]



Obr. 1.2 Postup výroby šróbu s valcovou hlavou [12]

1.1 Technologické pochody objemového tvárnenia za studena [1,3,4,]

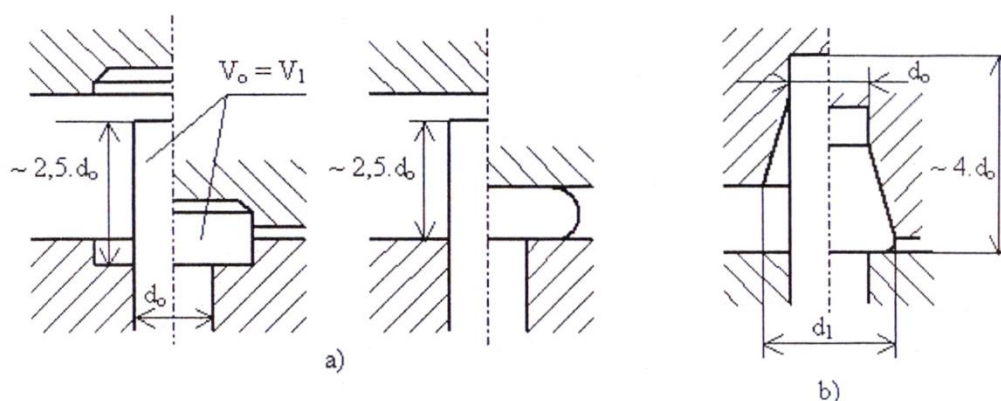
Poznáme niekoľko procesov objemového tvárnenia za studena a rozdelujeme ich podľa smeru pohybu nástroja a materiálu a taktiež podľa pomeru prierezov pred a po uskutočnení danej operácie.

Hlavné druhy tvárnenia za studena:

- Ubíjanie (pěchování), nabíjanie
- Dopredné pretlačovanie, spätné pretlačovanie, stranové pretlačovanie, združené pretlačovanie, hydrostatické pretlačovanie
- Radiálne tvárnenie
- Kombinované tvárnenie

Ubíjanie [3,4]

Ubíjanie je proces, pri ktorom sa pôsobením tlaku materiál premiestňuje tak, že zväčšuje svoj pôvodný prierez a znižuje pôvodnú výšku. Ubíjanie môže byť voľné alebo uzavreté v dutine nástroja. Tento proces sa používa napríklad hojne na výrobu matic, menších súčiastok krúžkového tvaru alebo ako jedna z operácií v postupovom tvárnení, napríklad nabíjanie hláv šróbu, čapu a ako kalibrácia odstrihnutého polotovaru pred ďalšími operáciami.



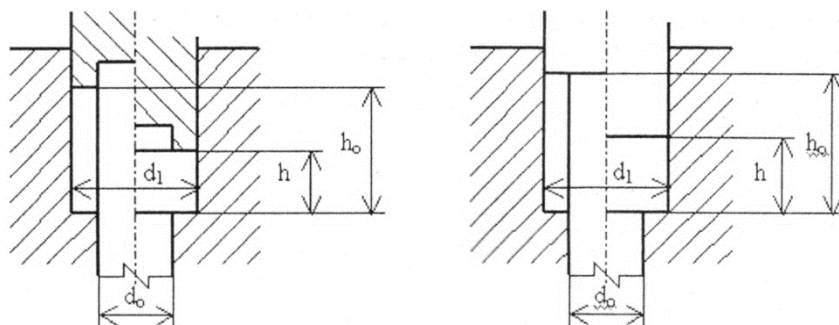
Obr. 1.3 Princíp ubíjania (a) a nabíjania (b) v tvárnení za studena [3]

Pri ubíjaní je jedným z obmedzení namáhanie výrobku na vzper, preto pri vyšších pomeroch počiatočnej výšky a priemeru je potrebné zaradiť proces nabíjania, kedy je výsledný tvar vyrobený na dva alebo viac zdvihov nástroja. Prvá operácia pretvorí polotovar do hrúškovitého tvaru a následne je hlava dokončená na finálny tvar – tento postup sa často používa napríklad v hromadnej výrobe šróbov, ktoré sú vyrobené z polotovaru s finálnym priemerom drieku. Výpočet štíhlostného pomeru udáva vzťah (1.1), pričom pri voľnom ubíjaní by tento pomer nemal prekročiť hodnotu 2,5 a pri nabíjaní sa pohybuje v rozmedzí 2,3÷4,7.

$$\lambda = \frac{h_0}{D_0} \quad (1.1)$$

Kde: λ štíhlostný (ubíjací) pomer [-]
 h_0 výška polotovaru [mm]
 D_0 priemer polotovaru [mm]

Nebezpečenstvo vybočenia polotovaru (vzperu) je možné znížiť nabíjaním v dutine nástroja. V tomto prípade je možné zvyšovať štíhlostný pomer so znižovaním pomeru d_1/d_0 . Pri pomere $d_1/d_0=1,5$ je možné ubíjať so štíhlostným pomerom $\lambda=3\div 6$.



Obr. 1.4 Nabíjanie v dutine – usmernené nabíjanie [3]

Pretlačovanie [1,3,4,]

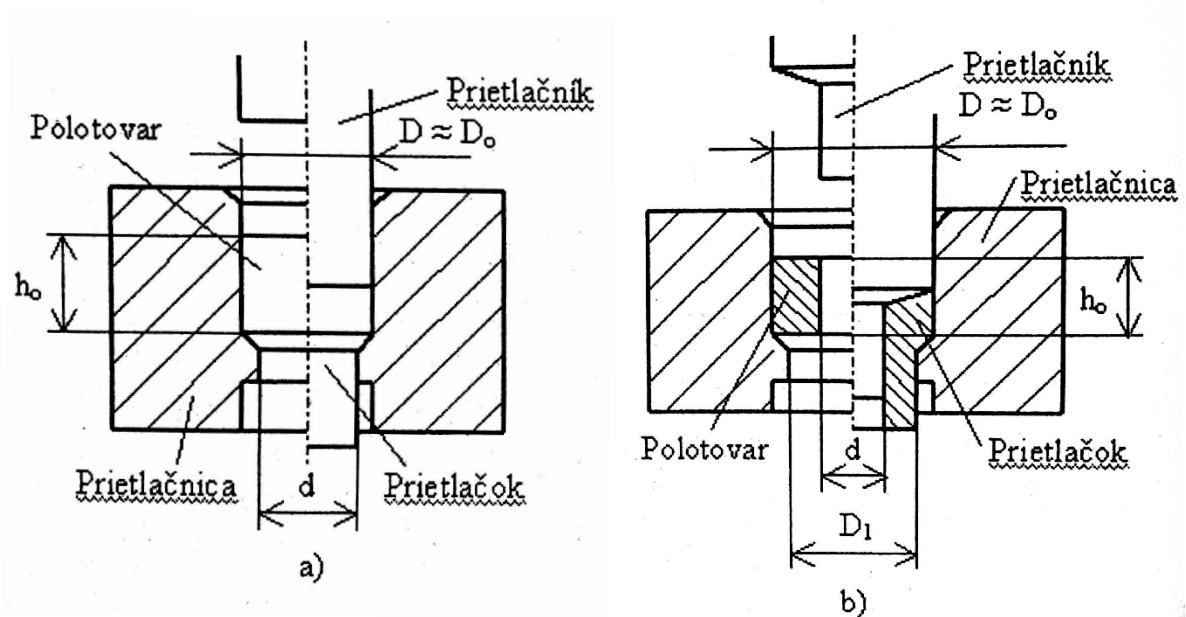
Druhým významným procesom v tvárnení za studena je pretlačovanie. Charakteristickým znakom je predlžovanie polotovaru a zmenšovanie jeho prierezu. Pri pretlačovaní pôsobí prietlačník na polotvar silou a vtlačá ho do prietlačnice, ktorá určuje finálny tvar výrobku. Obmedzením v tvárnení za studena je deformačný odpor, s ktorým súvisia aj rozmery výrobku. Preto sa v praxi za studena pretlačujú skôr súčasti menších rozmerov vyrobené z materiálov s vlastnosťami výhodnými pre tvárnenie za studena.

Vyrobiteľné tvary sú zpravidla duté alebo plné prierezy valcového tvaru, ktoré môžu mať jedno alebo viac osadení a taktiež niekoľko zmien prierezov. Vo všeobecnosti by mali byť vyrobené súčasti rotačného tvaru s výnimkou osovo symetrických tvarov (hexagonálny prierez a pod.). Pri iných nesymetrických tvaroch je obtiažne kontrolovať tok materiálu a nerovnomerné namáhanie nástrojov vedie k ich zníženej životnosti. Profily, výčnelky a ozubená rovnobežná s osou súčasti je možné vyrobiť s limitovanou presnosťou. Vnútorne aj vonkajšie závit a zápichy nie je možné pretlačiť a musia byť dorobené valcovaním alebo obrábaním.

Podľa smeru pohybu prietlačníku, prietlačnice a toku materiálu môžeme pretlačovanie rozdeliť na dopredné, spätné, stranové alebo kombinované. Špeciálnym prípadom pretlačovania je hydrostatické pretlačovanie kde je tlak na polotovar vyvinutý prostredníctvom hydraulického média.

- **Dopredné pretlačovanie**

Pri doprednom pretlačovaní vyvíja prietlačník tlak na materiál, ktorý následne prechádza statickou prietlačnicou a tým mení svoj prierez. Pretlačovať je možné plné aj duté telesá. Typické súčasti vyrábané dopredným pretlačením sú krátke hriadele a čapy. Schému dopredného pretlačovania zobrazuje obr.1.5 Využiť je možné celý priemer polotovaru alebo sa používa postup pretlačovania tzv. na kôru (na košili) kedy prietlačník orezáva tenkú vrstvu polotovaru, ktorá ostáva v zásobníku prietlačnice. Tento nadbytočný materiál pôsobí ako mazivo a zabraňuje defektom, ktoré môžu vzniknúť vplyvom nedokonalého povrchu polotovaru. Používa sa najmä pri tvárnení neželezných kovov.

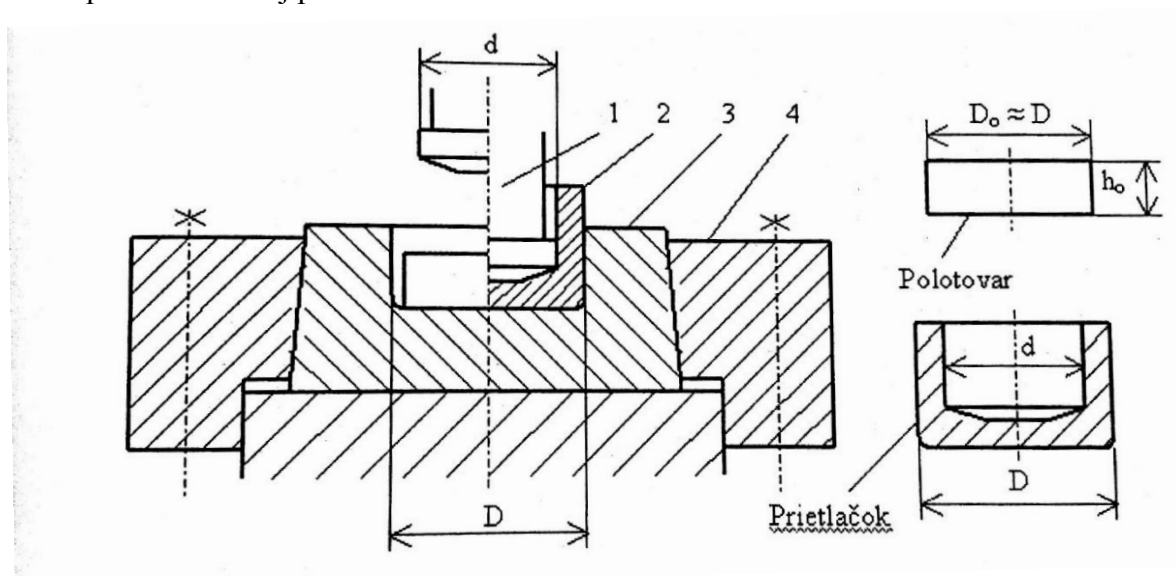


Obr. 1.5 Schéma dopredného pretlačovania [3]

- a) Plný profil
- b) Dutý profil

- **Spätné pretlačovanie**

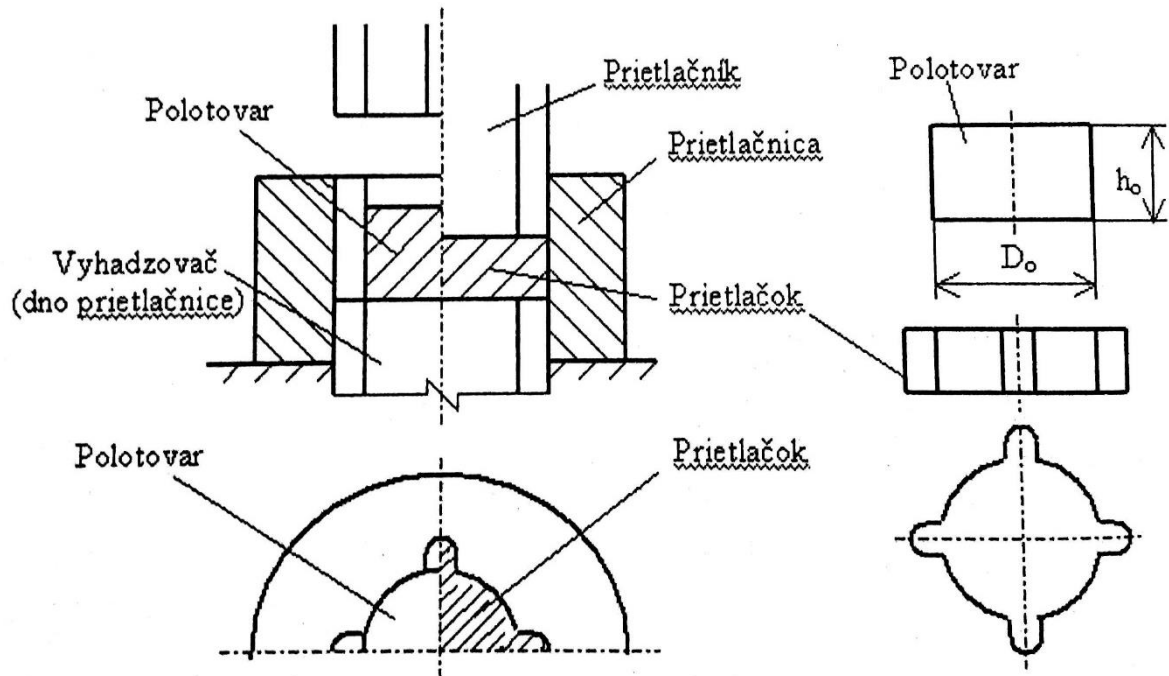
Pri spätnom pretlačovaní je sa tvárnený materiál pohybuje proti smeru pohybu prietlačníku a mení svoj prierez a tvar podľa tvaru statickej prietlačnice. Vyrábané súčasti sú zpravidla kalichovitého tvaru. Hrúbku steny určuje medzera medzi prietlačníkom a prietlačnicou. Obr.1.6 zobrazuje schematicky pochod spätného pretlačovania. Spätné je taktiež možné pretlačiť duté aj plné súčasti.



Obr. 1.6 Schéma spätného pretlačovania[3]

- **Stranové pretlačovanie**

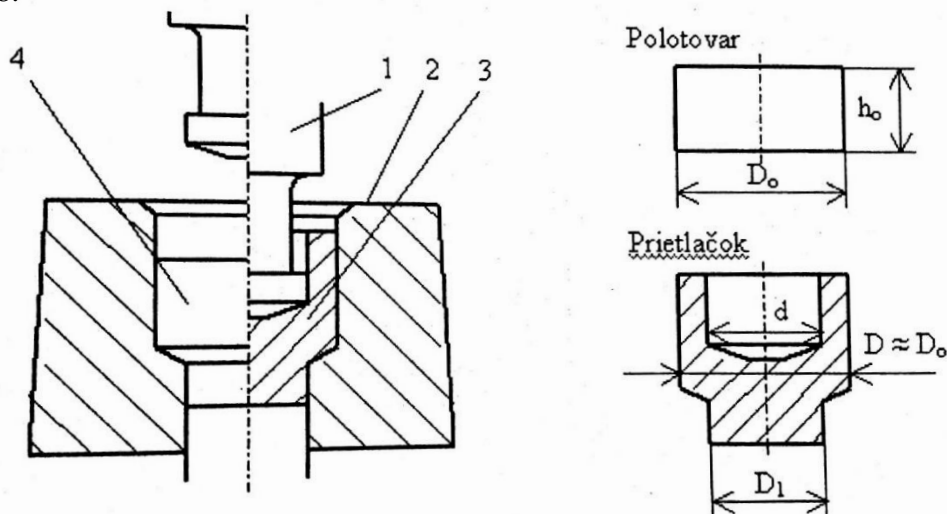
Stranové pretlačovanie sa od predošlých líši predovšetkým smerom prúdenia materiálu, ktorý je kolmý na smer pohybu pôsobiacich nástrojov – vid. Obr. 1.7. Stranové pretlačovanie má využitie vo výrobe osadení na hriadelových súčiastiach a pri výrobe výstupkov pravidelného či nepravidelného tvaru.



Obr. 1.7 Schéma stranového pretlačovania [3]

- **Kombinované pretlačovanie**

Kombinované (združené) pretlačovanie spája dopredné aj spätné pretlačovanie do jednej operácie, to znamená že materiál tečie v smere aj proti smeru pohybu prietlačníku – viz. Obr.1.8.



Obr.1.8 Schéma kombinovaného pretlačovania. 1-prietlačník, 2- prietlačnica, 3-výrobok, 4-polotovár [3]

Táto metóda umožňuje na jeden pracovný zdvih vyrobiť zložitejšie súčasti avšak pre hladký chod procesu a vyhovujúcu kvalitu výrobku treba dodržať niekoľko zásad:

- Voliť stupeň pretvorenia v spodnej časti (časť, ktorá má pohyb súsledný s prietlačníkom) menší ako v hornej časti prietlačku
- Používať postup pri výrobe menej zložitých prietlačkov, ktoré kombinujú kalíškovanie s operáciou pretlačenia plného profilu
- Používať v prípadoch kedy dutina v jednej časti výlisku je menšia (aspoň o 30%) než dutina v druhej časti

V iných prípadoch je vhodnejšie rozložiť tento krok na dve operácie alebo použiť špeciálny stroj, ktorý umožňuje protichodný pohyb prietlačníkov. Polotovarom v tejto operácii môže byť dierovaný rondel, prstenec alebo špalík.

Ďalšie (nekonvenčné) metódy sú zobrazené v prílohe č.1.

1.2 Termomechanické podmienky tvárnenia [3,4]

Schopnosť materiálu plasticky sa deformovať je závislá na termomechanických podmienkach daného procesu. Sem patrí teplota, charakteristiky pretvorenia a napätia.

- **Teplota**

V teórii sa tvárnenie za studena považujú procesy, ktoré používajú polotovar pod teplotou rekryštalizácie. V praxi sa používa teplota do 0,1 násobku teploty tavenia alebo izbová teplota. Pri samotnej deformácii však vzniká teplo, ktoré je odvádzané iba nástrojom a toto teplo by za určitých podmienok mohlo spôsobiť zvýšenie teploty výrobku nad hranicu rekryštalizácie. Preto treba počítať s obmedzením rýchlosti tvárnenia tak aby táto podmienka bola splnená.

- **Charakteristiky pretvorenia**

Poznáme pretvorenie pomerné a logaritmické. V praxi sa používa logaritmické (skutočné) pretvorenie

Vzťah pomerného pretvorenia pre ťah/tlak vo vlačovej geometrii:

$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} = \pm \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1.2)$$

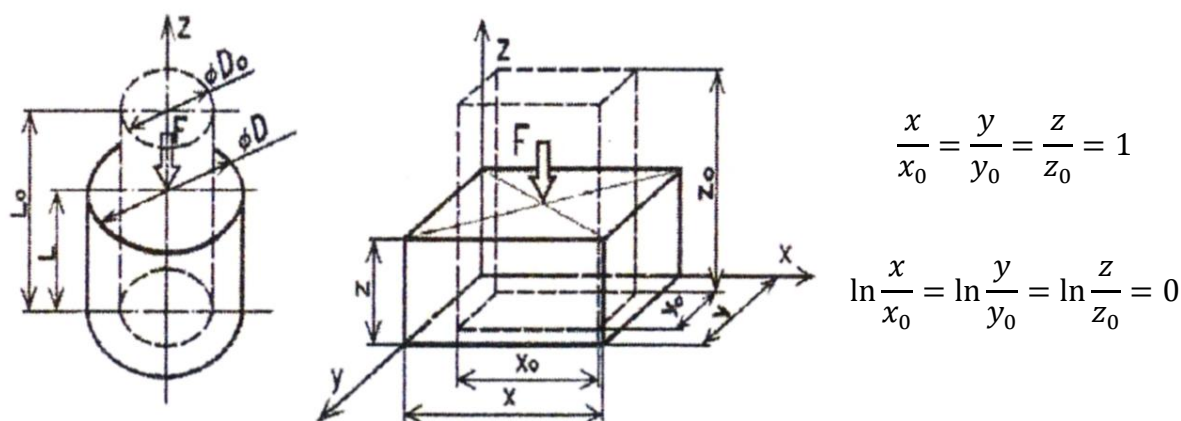
| | | | |
|------|---------------|---------------------|------|
| Kde: | ε | pomerné pretvorenie | [-] |
| | L_0 | počiatočná dĺžka | [mm] |
| | L | konečná dĺžka | [mm] |

Vzťah skutočného pretvorenia pre ťah/tlak vo valcovej geometrii:

$$\varphi = \pm \ln \frac{L}{L_0} \quad (1.3)$$

| | | | |
|------|-----------|---------------------|------|
| Kde: | φ | početné pretvorenie | [-] |
| | L_0 | počiatočná dĺžka | [mm] |
| | L | konečná dĺžka | [mm] |

Zo zákona zachovania objemu vychádza, že súčet logaritmických pretvorení v hlavných smeroch x, y, z je po deformácii vždy nulový vid. Obr.1.9.



Obr. 1.9 – Znázornenie konštantného súčtu pomerného a logaritmického pretvorenia v troch hlavných smeroch [4]

- **Rýchlosť tvárenia a pretvorenia**

Rýchlosť tvárenia udáva stroj a v závislosti na jeho konštrukcii môže byť konštantná alebo sa meniť s dráhou baranu. Udáva sa v [m/s]. R

Rýchlosť pretvorenia je definovaná ako zmena logaritmického pretvorenia za jednotku času.

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} \quad (1.4)$$

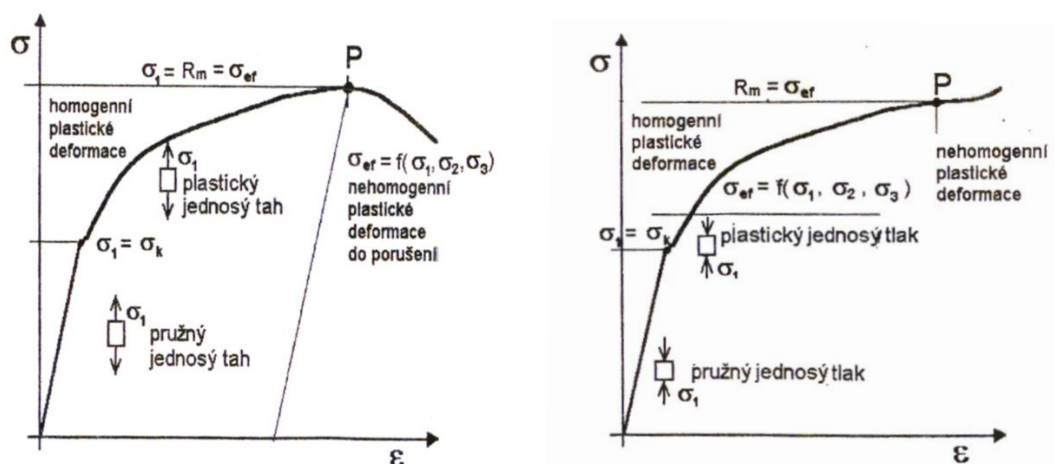
| | | | |
|------|-----------------|----------------------|-------|
| Kde: | $\dot{\varphi}$ | rýchlosť pretvorenia | [1/s] |
| | φ | skutočné pretvorenie | [-] |
| | t | čas | [s] |

Ak rýchlosť pretvorenia prekročí hodnotu 10^3 s^{-1} , hovoríme o vysokorýchlostnom tvárnení a môže nastať pretvorenie lokalizované do vrstiev, ktoré sú v kontakte s pohyblivou časťou nástroja.

1.3 Prirodzený pretvárny odpor a krivky spevnenia [4, 5, 8, 13]

V tvárnení sa používajú hodnoty zmluvných a skutočných napätí. Skutočné napätia, narozdiel od zmluvných, rešpektujú zmenu geometrie skúšanej vzorky v priebehu zaťažovania. Závislosť skutočného napätia na deformácii pri danej teplote a rýchlosti deformácie zobrazujú krivky spevnenia. Krivky spevnenia sú výsledkom experimentov a každý materiál má charakteristickú krivku pre konkrétne chemické zloženie a tepelné spracovanie. Poznáme krivky 1. a 2. druhu:

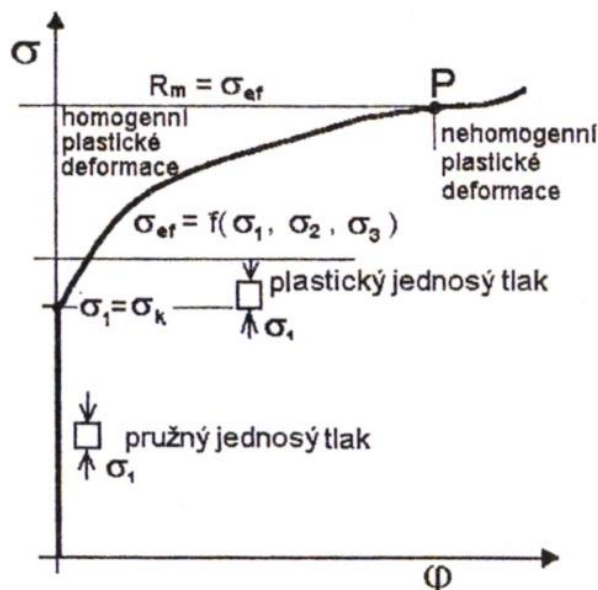
1.druhu – závislosť napätia na pomernej deformácii – vid. obr.1.10



Obr. 1.10 – Diagram napätie-deformácia 1.druhu zmluvný (vľavo) a skutočný (vpravo) [4]

Medza pevnosti R_m je v tvárnení limitujúci bod, kedy dochádza k lokálnej plastickej deformácii – pri ťahovej skúške je to vznik krčku. Na obr.10 je označený písmenom P. Zmluvný diagram sa od skutočného líši v tom, že nezohľadňuje zmenu prierezu skúšaného telesa – charakteristický pokles zmluvného napätia za bodom vzniku lokálnych plastických deformácií.

2.druhu – závislosť napätia na skutočnej (logaritmickej) deformácii – vid. obr.1.11

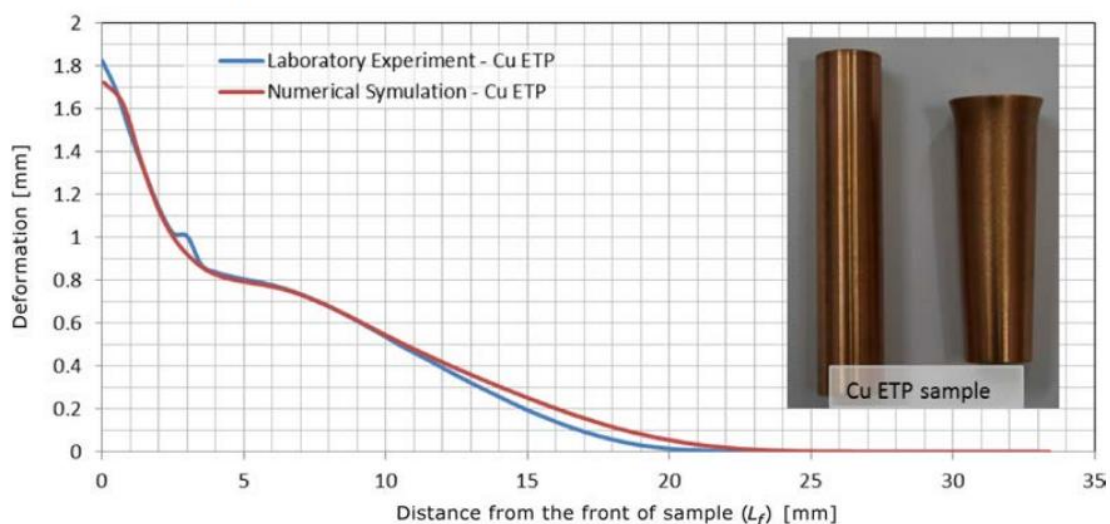


Obr.1.11 - Diagram napätie-deformácia 2.druhu [4]

Pre výpočty v tvárnení sa používajú matematické aproximácie týchto kriviek. Krivky 1.druhu sú aproximované tzv. pružne-plastickými modelmi a krivky 2.druhu tuho-plastickými modelmi.

Prirodzený pretvárný odpor je odpor materiálu voči plastickej deformácii pôsobením vonkajších síl za daných termomechanických podmienok – T , φ , $\dot{\varphi}$. S rastúcou plastickeou deformáciou sa vplyvom zmeny mikroštruktúry materiálu zvyšuje prirodzený pretvárný odpor. Závislosti pretvárneho odporu na deformácií môžeme získať výpočtom alebo experimentálne. Jedným z významných modelov, ktorý slúži na určenie pretvárneho odporu pri rýchlostiach deformácie, ktoré nemožno označiť za kvazistatické je model podľa **Johnson-Cooka**.

Aby bolo možné uplatniť Johnson-Cookov model, je potrebné stanoviť 5 parametrov - σ_0 , B, C, n, m. Tieto parametre sa stanovujú použitím Taylorovho kompresného rázového testu, kde je skúšobná vzorka zdeformovaná do kužlovitého tvaru, vid. obr. 1.12. Následne po premeraní vzorku sú pomocou simulácie metódou konečných prvkov (napr. Software LS-DYNA, Ansys Autodyn) určené parametre Johnson-Cookovho modelu tak aby simulácia čo možno najviac odpovedala realite pri daných termomechanických podmienkach a chemickom zložení. Taylorov kompresný test umožňuje dosiahnuť vysokých rýchlostí deformácie pri relatívne nízkych rýchlostiach pohybu vzorky.



Obr. 1.12 – Vzorka medi Cu-ETP pred a po dopade a porovnanie tvaru získaného experimentom (modrá) a simuláciou MKP (červená) [8]

$$\sigma = (\sigma_0 + B \times \varphi^n) \times \left(1 + C \times \ln \frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_0}\right) \times [1 - (T^*)^m] \quad (1.5)$$

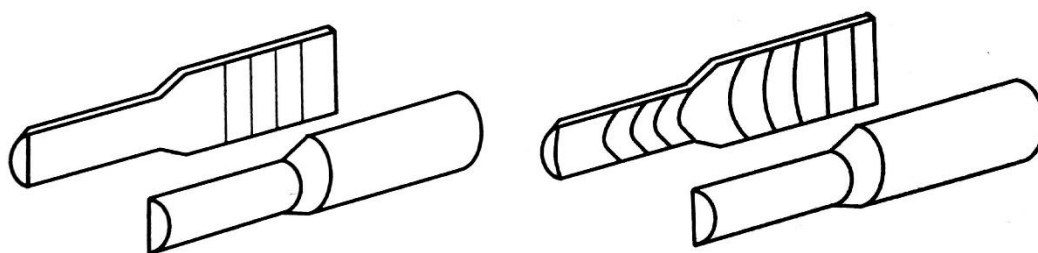
| | | | |
|------|-------------------|---|--------------------|
| Kde: | σ | prirodzený pretvárný odpor | [MPa] |
| | σ_0 | medza klzu | [MPa] |
| | $\dot{\varphi}$ | rýchlosť deformácie | [s ⁻¹] |
| | $\dot{\varphi}_0$ | referenčná rýchlosť deformácie (=1) | [s ⁻¹] |
| | T^* | homologická teplota | [-] |
| | B | pevnostný parameter | [-] |
| | C | parameter citlivosti na rýchlosť deformácie | [-] |
| | n | exponent spevnenia | [-] |
| | m | exponent homologickej teploty | [-] |

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \quad (1.6)$$

| | | | |
|------|-------|---|-----|
| Kde: | T | teplota procesu | [K] |
| | T_0 | teplota okolia pri statickej medzi klzu | [K] |
| | T_m | teplota tavenia | [K] |

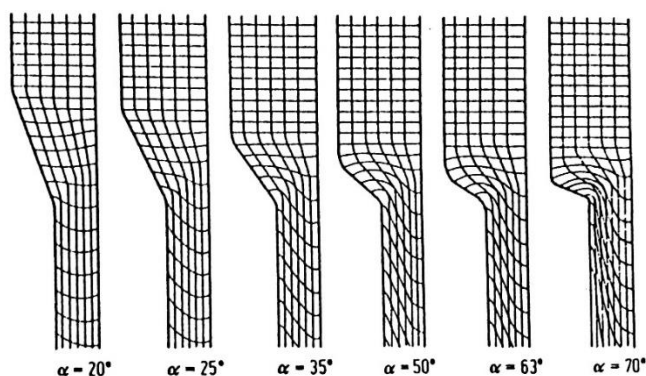
1.4 Tok materiálu pri pretlačovaní [1, 7, 11]

Tok materiálu je v priebehu lisovania nerovnomerný a môže viesť k početným vadám výliskov. Z tohto dôvodu je tok materiálu pri všetkých významných zliatinách podrobne skúmaný aby ho bolo možné optimalizovať a predchádzať tak vadám. Priebeh materiálu pri lisovaní je možné sledovať tak, že materiál rozdelíme štvorcovou alebo obdĺžnikovou sieťou a po pretlačení sa skúma zdeformovaná sieť. Najčastejšou metódou je rozrezanie čapu pozdĺžne a následné naniesenie siete na rozrezaný povrch leptaním alebo vybrúsením. Následne je nanesené mazivo na rozrezané plochy, ktoré zabráni zvareniu materiálu pri lisovaní. Po čiastočnom pretlačení je možné pozorovať tok materiálu na zdeformovanej sieti – vid. obr.1.13. Ďalšou metódou je navŕtanie otvorov do polotovaru a vloženie iného materiálu s čo možno najviac podobnými mechanickými vlastnosťami ako sú vlastnosti tvárneného materiálu. Následne po deformácii je vzorka rozrezaná a v prípade potreby naleptaná, čo zlepší viditeľnosť toku materiálu.



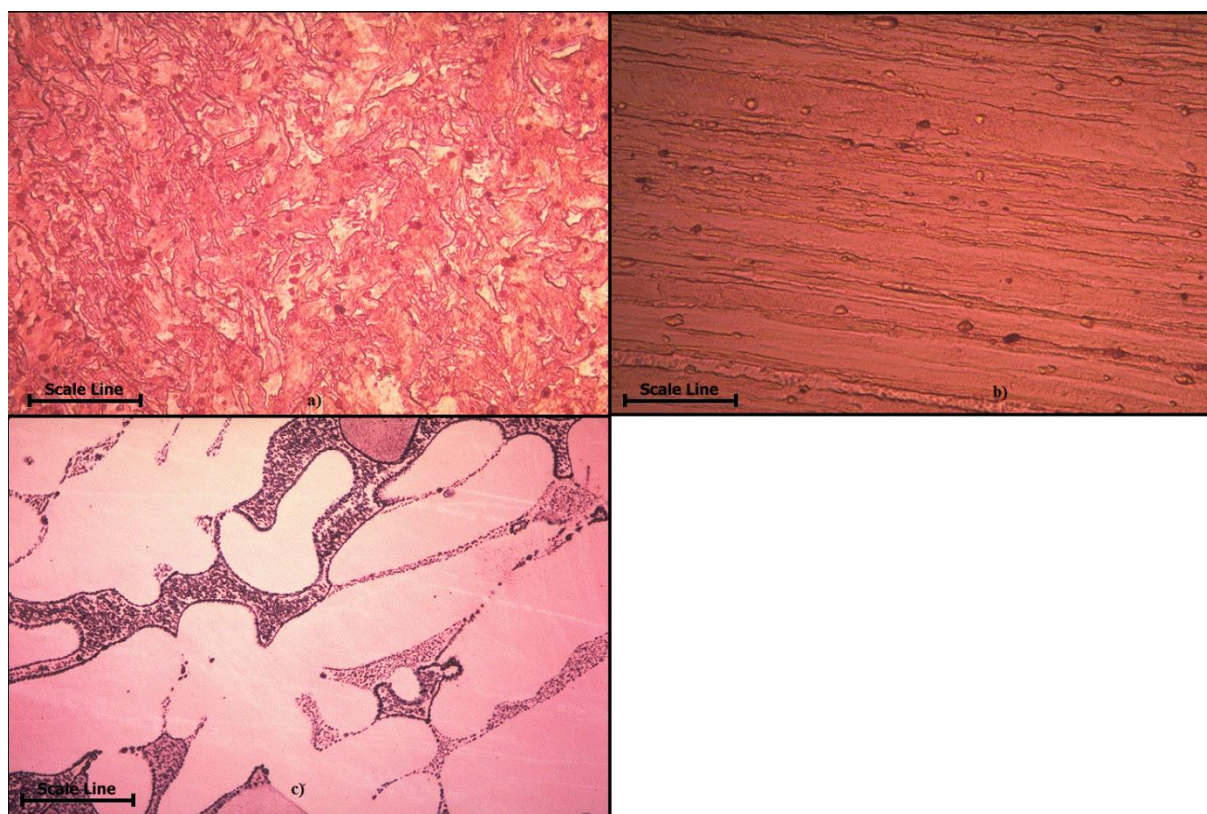
Obr. 1.13 – Rozrezaná skúšobná vzorka pred (vľavo) a po deformácii (vpravo) [10]

Jednotlivé elementy siete sú v zúžení formy stláčané v radiálnom smere a predlžované v axiálnom smere. Pri materiáloch s vyššími mechanickými vlastnosťami a pri nižších logaritmických pretvoreniach ($\varphi < 0,4$) je možný výskyt konkávneho negatívneho zaoblenia povrchu na hornej strane výrobku, ktorá ešte neprešla zúžením. Toto je možné vysvetliť tak, že jadro výrobku ostáva elastické, zatiaľ čo po bokoch je materiál deformovaný plasticky. Vo všeobecnosti možno povedať, že najväčší vplyv na tok materiálu majú geometria nástrojov a trenie. Vplyv uhla redukčného kužela na deformáciu štvorcovej siete je možné vidieť na obrázku 1.14.



Obr. 1.14 – Tok materiálu v prietlačnici s rôznymi vrcholovými uhlami [17]

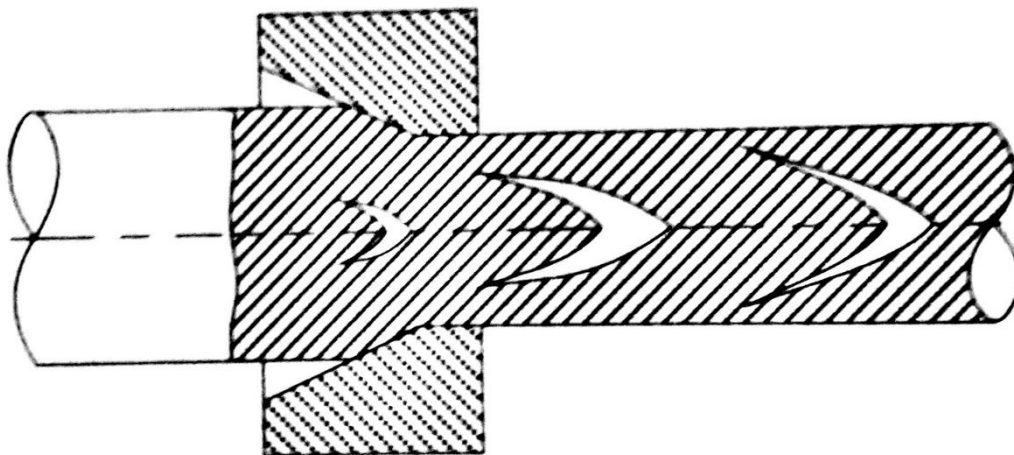
Pretlačovanie má za následok vznik anizotropickej štruktúry s anizotropickými vlastnosťami – zrná sú predĺžené v smere toku materiálu. Na obrázku 1.15 je porovnanie štruktúr medzi v závislosti na orientácii rezu a tepelnom spracovaní materiálu.



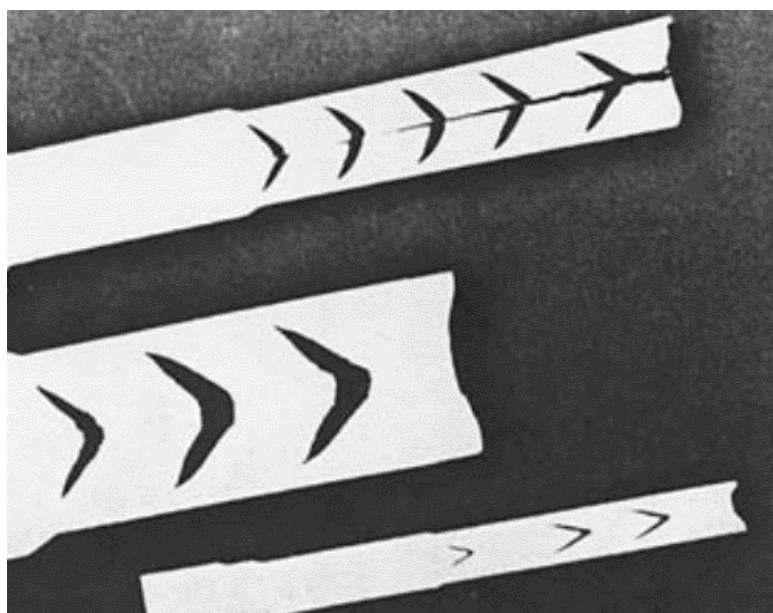
Obr. 1.15 – Fotografie kryštalografických výbrusov Cu [16]

- a) ťahaný drôt – priečny rez
- b) ťahaný drôt – pozdĺžny rez
- c) odlievaná štruktúra

Významný defekt v toku materiálu pri pretlačovaní je vznik defektov v jadre pretlačku. Tento defekt je závažný aj napriek tomu, že nie je veľmi častý, a to z toho dôvodu že sa neprejavuje na povrchu a preto ho nie je možné voľným okom identifikovať. Trhliny je možné vidieť v pozdĺžnom priereze pretlačku a pripomínajú šípky orientované v smere toku materiálu – vid. obr. 1.16, 1.17.



Obr.1.16 – Schéma vzniku a šírenia porušení [17]



Obr. 1.17 – Fotografia skutočných priereznov pretlačkov s porušeniami v jadre (hore)
[17]

Tieto porušenia sú spôsobované periodickými ťahovými napätiami, ktoré vznikajú nehomogénnymi deformáciami, ktoré spôsobujú náhle zrýchlenie toku kovu v prietlačnici. Vyskytujú sa pri relatívne nízkych redukciách, relatívne veľkých uhloch redukčných kuželov, vysokom trení a po výraznej deformácii za studena. Z horeuvedeného vychádza, že zamedziť vzniku trhlín je možné zväčšením redukcie, znížením uhlu redukčného kužela prietlačnice, znížením trenia a zvýšením plastických schopností vhodnou voľbou materiálu alebo tepelným spracovaním – rekryštalizáciou.

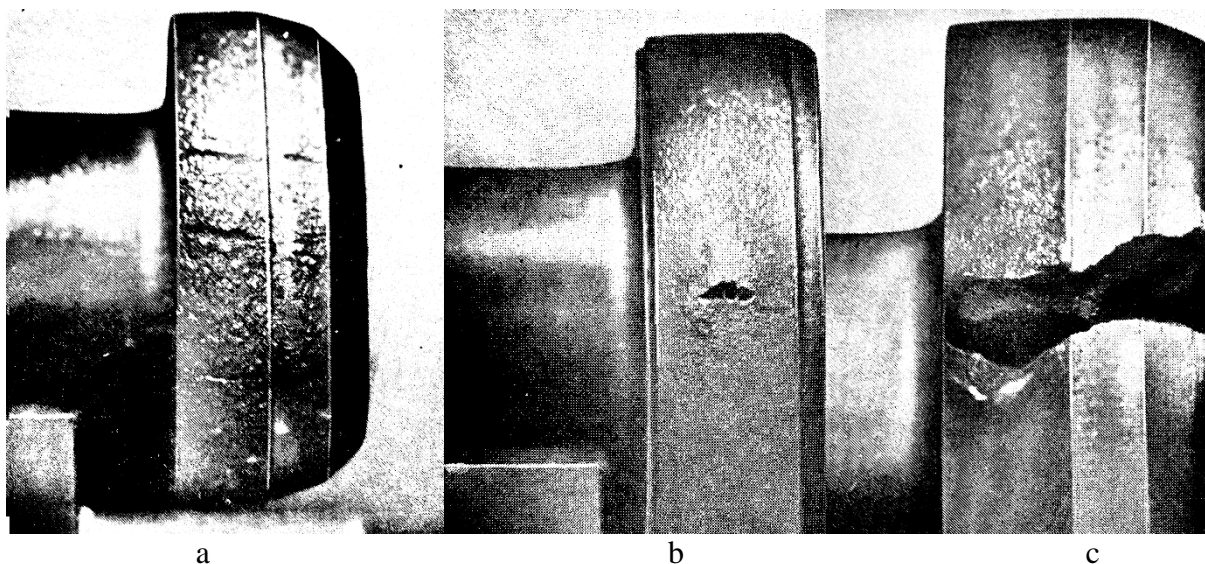
Mazanie je veľmi dôležitým prvkom v procese pretlačovania, pretože sa uskutočňuje za veľmi vysokého normálového tlaku. Požiadavky na mazivá sú dobrý koeficient trenia, dobrá odolnosť voči vysokému normálovému tlaku, dobrá priľnavosť k polotovaru (zmáčavosť), a zamedzenie

studenému zvaru výrobku a nástroja. Dobré mazanie je z technologického hľadiska veľmi dôležité, nakoľko v niektorých prípadoch môže sila na prekonanie trenia vytvárať až 50% celkovej sily potrebnej na daný proces pretlačenia. Pri pretlačovaní neželezných kovov sa používajú ako mazivá minerálne oleje, tuky a kovové stearáty – tzv. kovové mydlá. Veľmi dôležitý faktor je taktiež správne a rovnomerné nanosenie maziva.

1.5 Polotovary vhodné pre pretlačovanie [1, 2, 3, 7]

Ako polotovary sa najčastejšie používa tyčový materiál vhodného prierezu, najčastejšie kruhového, štvorcového, šesťhranného a podobne. Menšie priemery polotovarov je možné deliť zo zvitku drótu. Z týchto profilov sú následne oddelené špalíky strihaním na nožniciach, pílením alebo vo výnimočných prípadoch upichovaním na sústruhu. Delenie polotovaru na sústruhu má vo všeobecnosti zmysel iba v prípade, že v polotovare je požadovaná diera a podobne. Nevýhodou pílenia a upichovania je nízky výkon a stratový materiál v podobe odobranej triesky. Na rozdiel od strihania však produkujú rozmerovo presnejšie polotovary s rovnými čelami. Nerovnobežné plochy na čele polotovaru vznikuté strihaním je potrebné odstrániť, najčastejšie kalibráciou polotovaru pred samotným tvárnením.

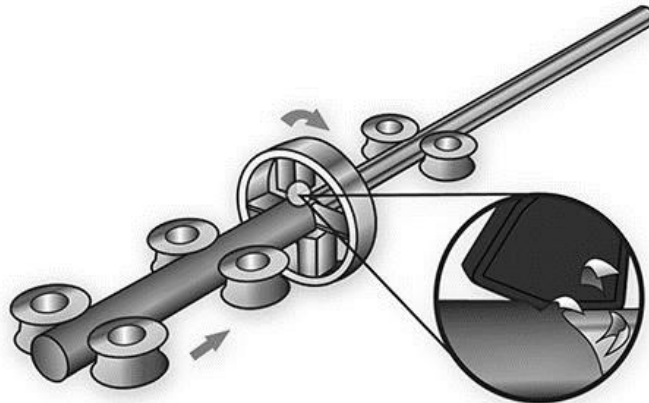
Akékolvek vnútorné a vonkajšie vady ovplyvňujú akosť výrobkov a tvárnením sa ich efekt umocňuje, preto sú vo východných polotovaroch nežiaduce. Bubliny vznikajú v materiáli, ktorý nebol alebo bol slabo dezoxidovaný. Povrchové bubliny spôsobujú po pretvorení povrchové trhliny. Sulfidické a oxidické inklúzie (vměstky) narušujú súdržnosť kovov. V tomto prípade má vplyv ich druh a rozmiestnenie. Jemné a rovnomerné inklúzie nemajú pri tvárnení zásadný vplyv na tvárnosť a mechanické vlastnosti. Veľké inklúzie alebo ich zhluky môžu spôsobovať na tvárnených súčiastkach trhliny. Z tohto dôvodu je vyžadovaná určitá chemická čistota vstupného materiálu. Prevalky môžu vzniknúť nesprávnou kalibráciou a postupom pri valcovaní polotovaru. Prevalky taktiež spôsobujú trhliny v tvárnenom materiáli. Zavalcované okraje môžu spôsobiť nepríjemné povrchové vady. Trhliny a ryhy sú zpravidla na polotovare neprípustné. Dôsledky tvárnenia s defektným polotovarom sú na obr. 1.18.



Obr. 1.18– Defekty, ktoré vznikli v dôsledku defektného polotovaru [2]

- a) trhliny spôsobené povrchovými bublinami
- b) trhliny spôsobené inklúziami
- c) trhliny spôsobené prítomnosťou prevalkov v polotovare

V prípade, že má polotovár povrchové vady alebo okuje, je potrebné zaradiť operáciu lúpania tyče, ktorá má za úlohu túto nežiaducu povrchovú vrstvu odstrániť. Lúpanie tyčí sa vykonáva na špeciálnych strojoch a okrem odstránenia okují alebo povrchových vrstiev s nepriaznivým chemickým zložením slúži aj na zaistenie presného priemeru polotovaru. Schematicky je lúpanie znázornené na obr. 1.19. Pri použití ťahaných tyčí, ktoré sú drahšie, táto operácia odpadá.



Obr. 1.19 – Lúpanie tyče použitím lúpacej hlavy so 4 britovými doskami

V bežnej praxi sú medené polotovary pretlačované bez špeciálnej prípravy povrchu pred nanesením maziva. V prípade zliatin medi s vyššími mechanickými vlastnosťami alebo procesu s vysokou mierou pretvorenia sa polotovary odmasťujú, odstraňujú sa oxidy v roztoku kyseliny sírovej, neutralizujú a následne je nanosené mazivo. Týmto mazivom je často napríklad kovové mydlo - stearát zinočnatý.

1.6 Nástroje pre objemové tvárnenie za studena [1, 4, 5, 17, 18]

Všeobecné zásady pri konštrukcii nástrojov v tvárnení sú jednoduchosť, bezporuchovosť, ľahká obsluha, rýchla a ľahká možnosť výmeny. Zároveň čo možno nízke náklady na obstaranie a údržbu nástroja, a to s prihliadnutím na objem výroby danej súčasti keďže tieto nástroje nie sú univerzálne. Nároky kladené na nástroje v tvárnení za studena sú vysoké a vychádzajú z niekoľkých vstupných podmienok, ktorými sú materiál, tvar a veľkosť výrobku, výrobný stroj, použitá technológia, veľkosť deformácie, tolerancia výrobku a podobne. Medzi niektoré hlavné zásady, na ktoré treba pri konštrukcii nástrojov prihliadať patria:

- Zaistenie dostatočnej tuhosti nástrojov - konštrukcia nástroja musí zamedzovať akémukolvek pruženiu, ktoré by spôsobovalo nepresnosti výliskov. Tomuto sa predchádza voľbou masívnych oporných dosiek, a kalených podložiek najviac zaťažovaných častí nástroja ako sú lisovník, lisovnica, vyhadzovač a podobne. Časti nástrojov, ktoré sú najviac opotrebovávané je potrebné voliť čo najmenšie a vymeniteľné, prietlačnice konštruovať raz alebo viackrát bandážované s dostatočným predpätím. Prietlačníky a lisovníky čo najkratšie bez náhlych veľkých zmien priemeru.

- Zaistenie súososti – použitím vodiacich stojanov s dvoma alebo viac vodiacimi stĺpkami alebo aj vedením prietlačníku priamo v prietlačnici ešte pred dotykom čela nástroja s polotovarom
- Zaistenie vyprázdnenia pracovného priestoru po operácii – konštrukciou nástrojov s vyhadzovačmi v spodnej a stieračmi vo vrchnej časti nástroja. Neodstránenie výrobku z pracovného priestoru nástroja pred ďalším zdvihom by malo za následok fatálne poškodenie nástroja.
- Zaistiť možnú rýchlu výmenu nástrojov - konštrukcia nástroja by mala umožniť jednotlivé prvky zostaviť alebo vymeniť mimo pracovného priestoru stroja. Tieto dielčie prvky, napríklad prietlačníková časť, musia byť následne rýchlo upnutelné do stojanu v stroji a ľahko vystrediteľné.
- Chladenie a mazanie funkčných častí nástroja – potrebné z dôvodu vysokého zahrievania výrobkov v procese pretvorenia a prenosu tepla do nástroja. Mazanie umožňuje lepšie vkladanie polotovaru do dutiny nástroja. Filtrácia chladiacej emulzie je potrebná z dôvodu vzniku jemných úlomkov kovu. Potrebné je taktiež odvzdušnenie všetkých miest, kde by mohlo dochádzať ku vzniku vzduchových vankúšov.

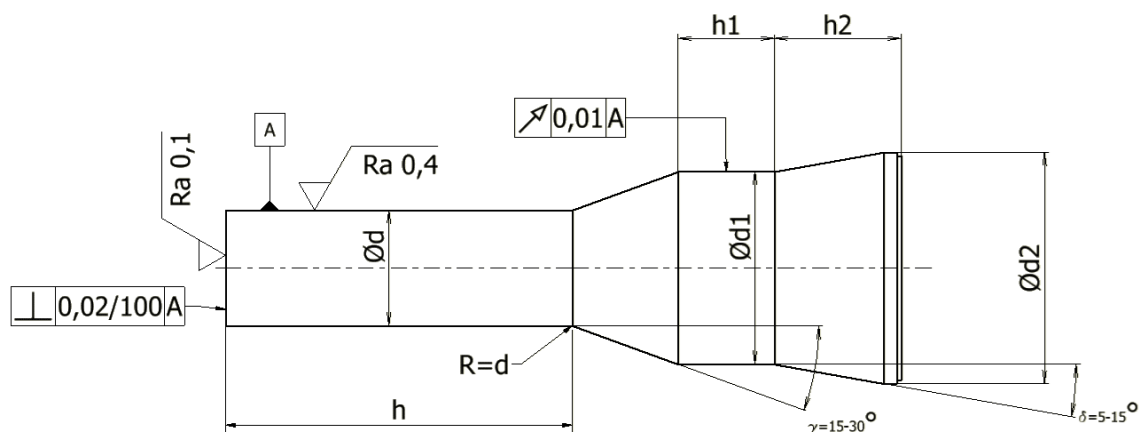
Konštrukcia nástrojov je odlišná aj v závislosti od použitého stroja. V prípade postupových tvárniacich automatov sa nástroje upínajú priamo do stojanu a baranu stroja. Funkčné časti prietlačnice a prietlačníkov sú uložené v púzdrach a držiakoch, ktoré je možné zostaviť mimo priestor stroja a rýchlo vymeniť. Prietlačníkové, resp. hlavovacie časti je možné vystrediť v dvoch osách priamo na barane stroja tak aby bola zaručená súososť protilahlých častí nástroja.

Z dôvodu vysokých merných tlakov v procese tvárnenia sú nástroje vyrábané z nástrojových ocelí výhradne triedy ČSN 19 xxx a ich zahraničných ekvivalentov. Dôležité u ocelí je taktiež tepelné spracovanie. Určité funkčné časti nástrojov môžu byť vyrobené zo slinovaných karbidov. Slinované karbidy rapídne predlžujú životnosť nástrojov vďaka zvýšenej odolnosti proti oteru. Literatúra uvádza 10-40 násobnú životnosť prietlačnice zo slinovaných karbidov oproti oceli. Vyššia drsnosť povrchu nástroja môže mať vplyv na zvýšený pretvárny odpor, avšak z pravidla nemá vplyv na drsnosť povrchu pretlačku. [17, 18]

1.6.1 Dopredné pretlačovanie

Prietlačník

Prietlačník pre dopredné pretlačovanie plných telies je najmenej namáhaný prietlačník, pretože je vedený dutinou prietlačnice. Taktiež je jeho konštrukcia z prietlačníkov najjednoduchšia – vid. obr. 1.20. Pre pretlačovanie plných profilov sa obvykle používa konštrukcia prietlačníku z jedného kusu. Konštrukcia prietlačníku s oddeleným trňom sa obvykle používa pri pretlačovaní dutých profilov, tieto trne môžu byť uchytené pevne alebo pohyblivo pomocou pružiny, ktorá pomáha kompenzovať ťahovú silu vznikajúcu trením medzi výrobkom a nástrojom v smere tečenia materiálu.



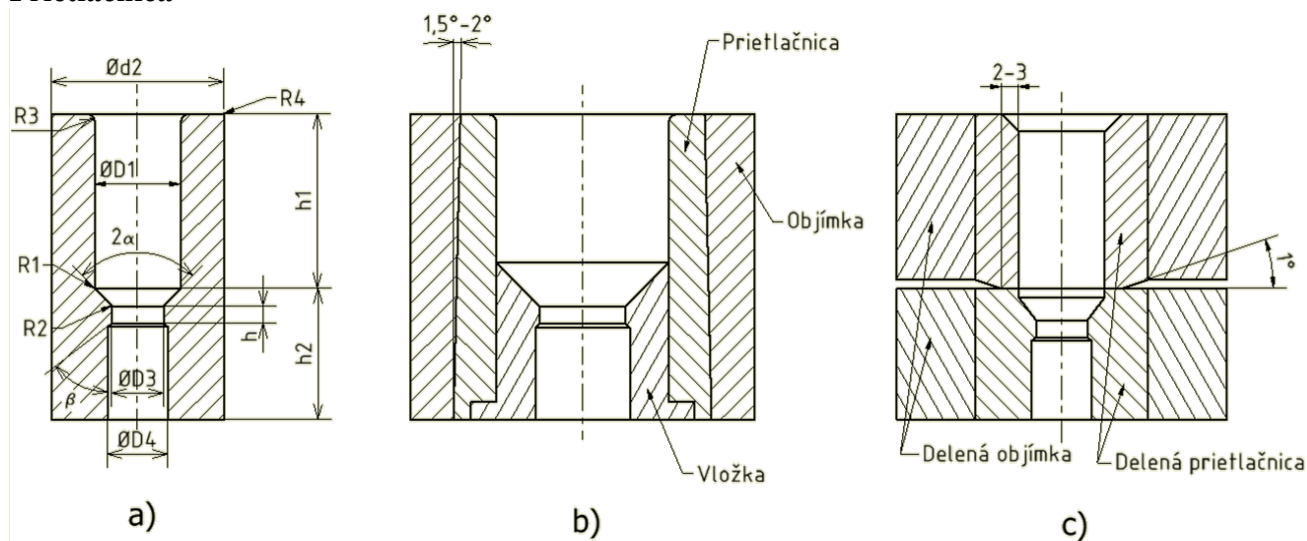
Obr.1.20 Prietlačník pre dopredné pretlačovanie plných profilov [4]

Tab. 1.1 Rozmery prietlačníku pre dopredné pretlačovanie [4]

| | |
|----------------------|-----------------------|
| h | $\leq 3 \cdot d$ |
| h₁ | $= 0,5 \cdot d_1$ |
| h₂ | $\geq 0,5 d_2$ |
| d₁ | $\approx 1,3 \cdot d$ |
| d₂ | $\approx 1,6 \cdot d$ |

Všeobecné požiadavky na prietlačníky sú čo najkratšia možná dĺžka, čím sa minimalizuje namáhanie na vzper. Ďalej čo najmenšie skoky v priereze prietlačníku, prechody opatrené zaoblením čo najväčšieho polomeru na zamedzenie koncentrácie napätia. Povrch prietlačníku musí byť bez viditeľných väd a funkčná plocha brúsená a lapovaná. Dosadacia plocha by mala byť rozšírená tak aby bolo rozložené tlakové napätie. Kuželové rozšírenie taktiež umožňuje rýchle vystredenie nástroja.

Prietlačnica



Obr. 1.21 (hore) Prietlačnice –
a)jednoduchá, b) s vložkou pozdĺžne delená, c) priečne delená

Tab. 1.2 Rozmery prietlačnice

| | |
|----------------------|-----------------------------|
| D₄ | $D_3 + (0,1 \div 0,2)$ |
| h | $0,5\sqrt{D_3}$ |
| 2α | 30°÷90° |
| R₁ | $(D_1 - D_3)/2$ |
| R₂ | $(0,05 \div 0,1) \cdot D_3$ |
| R₃ | $\approx 0,15 \cdot D_1$ |
| h₂ | min 0,7.D ₁ |
| β | 5°÷10° |

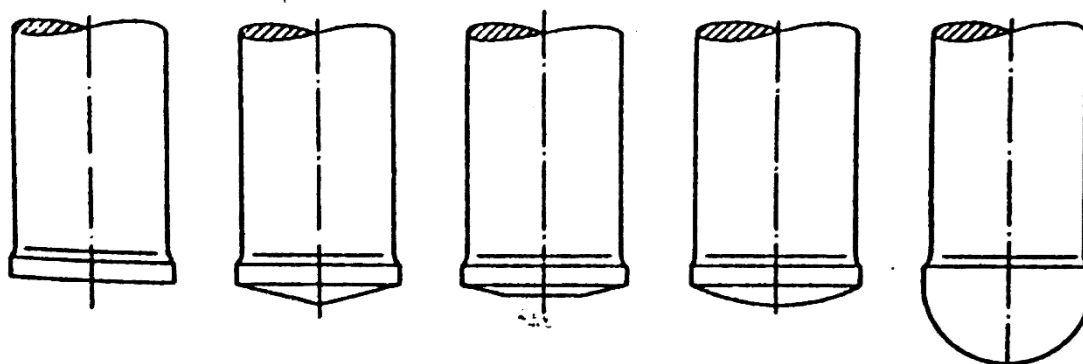
Redukčná časť prietlačnice značne ovplyvňuje veľkosť deformačného odporu, preto je najdôležitejším parametrom prietlačnice pri jej konštrukcii. Výrobne najjednoduchší a zároveň najpoužívanejší tvar je redukčný kužel. Použiť je možné niekoľko konštrukcií prietlačnice z hladiska počtu dielov – prietlačnica z jedného kusu, priečne delená prietlačnica, prietlačnica

Tabuľka zobrazuje rozmery jednoduchej prietlačnice podľa [4] pri teplote pretlačovania 20°C. Priemer D₁ musí byť dostatočne veľký na to, aby medzi prietlačnicou a prietlačníkom nevznikalo trenie a zároveň dosť malý na to, aby do vzniknutej medzery nevnikal materiál. Rádus prechodu do redukčného kužela R₁ by mal byť čo najväčší. Pre uľahčenie vkladania polotovaru je takmer nezbytné zaoblenie alebo skosenie vstupnej hrany prietlačnice. Odlahčenie D₄ za priemerom D₃ by malo byť čo najmenšie aby bolo zaistené vedenie pretlačeného výrobku, avšak dostatočne veľké na to, aby bola zachovaná vôľa voči výrobku aj po dovolenom opotrebení nástroja (priemeru D₃).

1.6.2 Spätné pretlačovanie

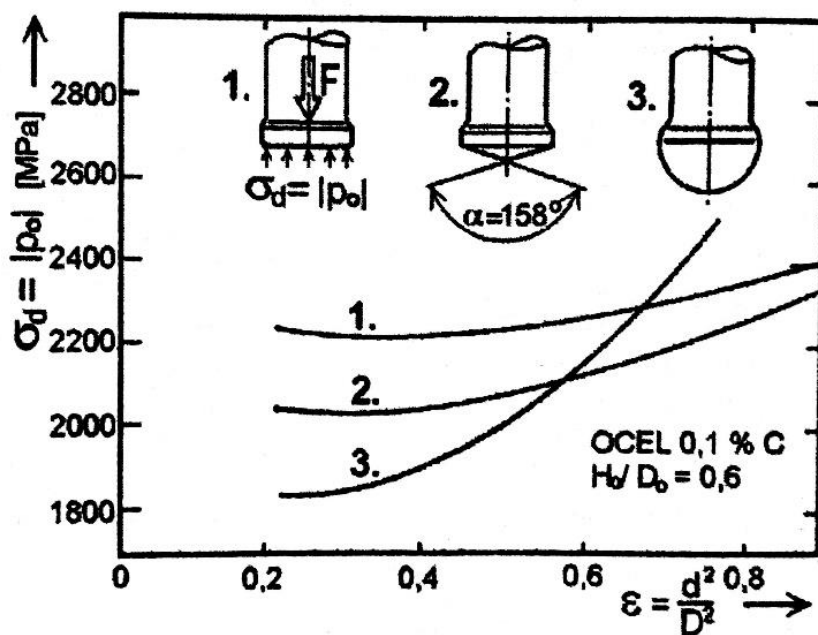
Prietlačník

Prietlačník pre spätné pretlačovanie je z hladiska smeru namáhaný veľmi nepriaznivo. Okrem namáhania tlakom môže vzniknúť aj namáhanie na ťah a ohyb. Tvar čela prietlačníku je kľúčový pre veľkosť napätia pri spätnom pretlačovaní. Niekoľko možných tvarov čela je na obr. 1.22 a závislosť deformačného odporu na tomto tvare je na obr.1.23.



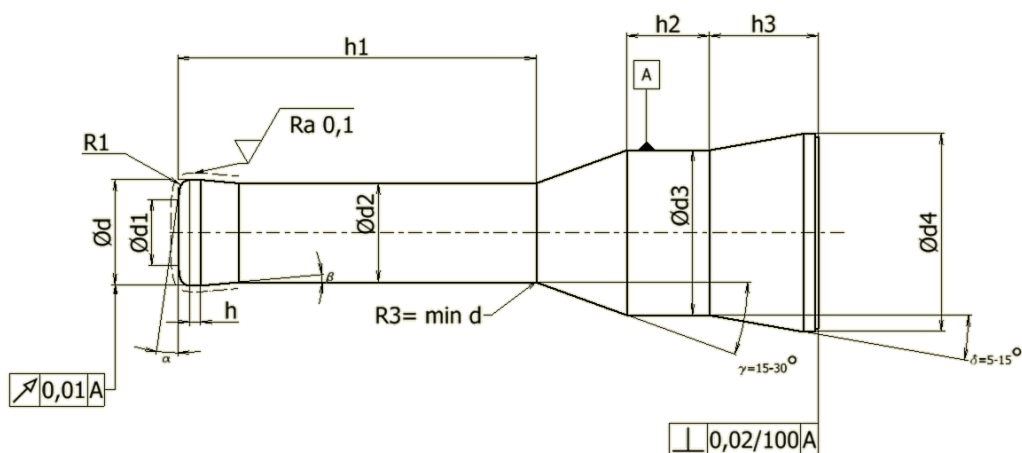
Obr 1.22

Rôzne tvary čela prietlačníku – zľava: rovné čelo, kužel, komolý kužel, gula [17]



Obr. 1.23 (vľavo)
Závislosť deformačného odporu na tvare čela prietlačníku [4]

Prvotným faktorom pri volbe tvaru čela je požadovaný výsledný tvar dna výrobku. Ako najoptimálnejší sa javí kuželový tvar čela, ktorý je výrobne jednoduchý. Vrcholový uhol sa volí podľa teploty procesu. Odľahčenie drieku prietlačníku za funkčnou plochou má významný vplyv na zníženie deformačného odporu, pretože zabraňuje vzniku trenia medzi výrobkom a nástrojom a znižuje silu potrebnú na odstránenie výrobku z prietlačníku - strieranie. Doporučená konštrukcia nástroja podľa [4] je na obrázku 1.24. V prípade väčších rozmerov je možné použiť delenú konštrukciu prietlačníku, ktorá sa skladá zo samotného prietlačníku a puzdra, v ktorom je prietlačník uložený. Táto konštrukcia je úspornejšia z hľadiska nákladnej nástrojovej oceli a má výhodnejší tvar pre tepelné spracovanie.



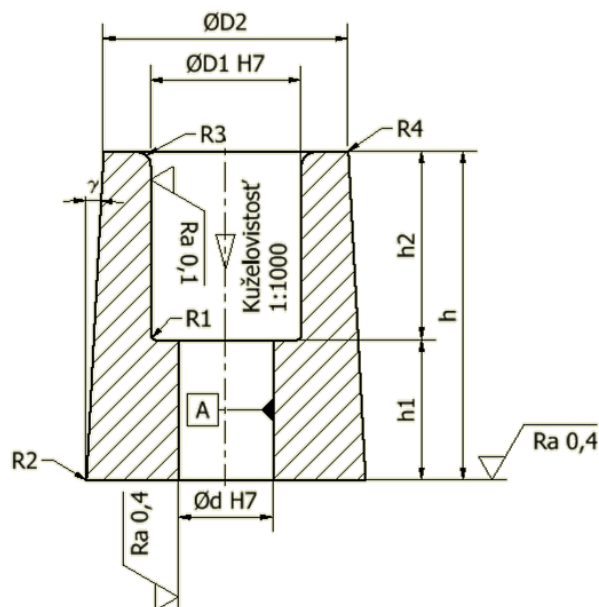
Obr. 1.24 – Konštrukcia prietlačníku pre spätné pretlačovanie s komolým kuželom na čelnej ploche [4]

Tab. 1.3 – Doporučené rozmery prietlačníku na obrázku 2.24 [4]

| | |
|-------------------|---------------------------|
| $\varnothing d_2$ | $d - (0,1 \div 0,2)$ |
| h | $0,5 \cdot \sqrt{d}$ |
| α | $5^\circ \div 8^\circ$ |
| R_1 | $(0,05 \div 0,1) \cdot d$ |
| R_3 | $\geq d$ |
| d_1 | $\approx 0,7 \cdot d$ |
| d_3 | $\approx 1,3 \cdot d$ |
| d_4 | $\approx 1,6 \cdot d$ |
| h_1 | $\leq 3 \cdot d$ |
| h_2 | $\approx d_3/2$ |
| h_3 | $\geq d_4/2$ |

Prietlačnica

Prietlačnice pre spätné pretlačovanie majú primárny tvar zodpovedajúci tvaru výlisku. Pri konštrukcii sa postupuje podobne ako pri prietlačniciach pre dopredné pretlačovanie. Miesta, kde môže dôjsť ku koncentrácii napätia je potrebné opatrit' rádiusmi, nábehovú hranu kuželovým zkosením alebo rádiusom aby bolo uľahčené vkladanie polotovaru. Funkčný povrch dutiny je brúsený a lapovaný a je opatrený miernou kuželovitosťou (1:1000), čo eliminuje osové ťahové napätie pri vyhadzovaní výrobku. Efekt ťahového napätia je možné znížiť axiálnym predpäťm celej zostavy prietlačnice, v tomto prípade je potrebné zapúzdrenie na kužel s väčším uhlom ($3 \div 4^\circ$). Axiálne predpäťie je taktiež potrebné pri použití priečne delených prietlačníc.



Obr. 1.25 – Prietlačnica pre spätné pretlačovanie[4]

Zaťaženie prietlačníc je možné zvýšiť bandážovaním do jednej alebo viac objímiek. Uloženie do objímiek je možné s predohrevom na valcovú plochu alebo na kuželovú plochu. Kuželová plocha umožňuje viacnásobnú výmenu v jednej objímke, avšak je nákladnejšia na výrobu, preto sa zpravidla používa pri veľkých prietlačniciach s veľkými objímkami. Dno prietlačnice je

tvorené vyhadzovačom, ktorý musí byť uložený tesne aby do medzery nevnikal materiál. Uloženie vyhadzovača je riešené v závislosti od teploty – pri teplote 20°C sa používa uloženie H7/f7.

1.7 Vzťahy pre určenie rýchlosti deformácie v konkrétnych operáciách [22]

Pretože pretvárný odpor bude určený pomocou Johnson-Cookovho vzťahu, je potrebné určiť rýchlosť deformácie pre každú operáciu a to znamená poznať vzťahy pre rozdielne geometrické modely pochodov. Vo všeobecnosti poznáme vo valcovej súradnicovej sústave tri hlavné smery a to axiálny, radiálny a tangenciálny. Pretože budeme riešiť procesy rotačnej symetrie, platí vzťah 1.6.

$$\dot{\varphi}_r = \dot{\varphi}_t \quad (1.6)$$

Kde $\dot{\varphi}_r$ radiálna rýchlosť pretvorenia $[s^{-1}]$
 $\dot{\varphi}_t$ tangenciálna rýchlosť pretvorenia $[s^{-1}]$

Zo zákona o nestlačiteľnosti tvárneného materiálu (1.7) môžeme odvodiť všeobecný vzťah pre axiálnu rýchlosť pretvorenia (1.8)

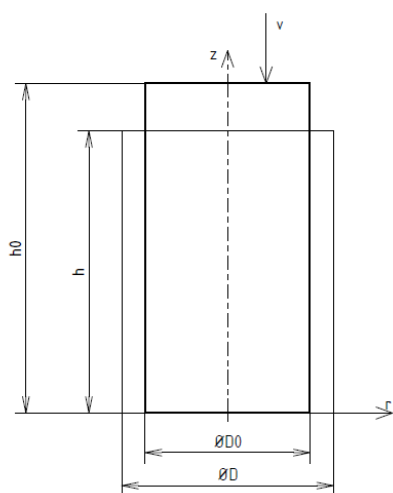
$$\dot{\varphi}_r + \dot{\varphi}_t + \dot{\varphi}_z = 0 \quad (1.7)$$

Kde $\dot{\varphi}_r$ radiálna rýchlosť pretvorenia $[s^{-1}]$
 $\dot{\varphi}_t$ tangenciálna rýchlosť pretvorenia $[s^{-1}]$
 $\dot{\varphi}_z$ axiálna rýchlosť pretvorenia $[s^{-1}]$

$$-\frac{1}{2} \dot{\varphi}_z = \dot{\varphi}_r = \dot{\varphi}_t \quad (1.8)$$

Zo vzťahu (1.8) vyplýva, že najväčšiu hodnotu rýchlosti deformácie má vždy axiálna zložka a preto bude v jednotlivých krokoch spočítaná práve táto.

Nabíjanie

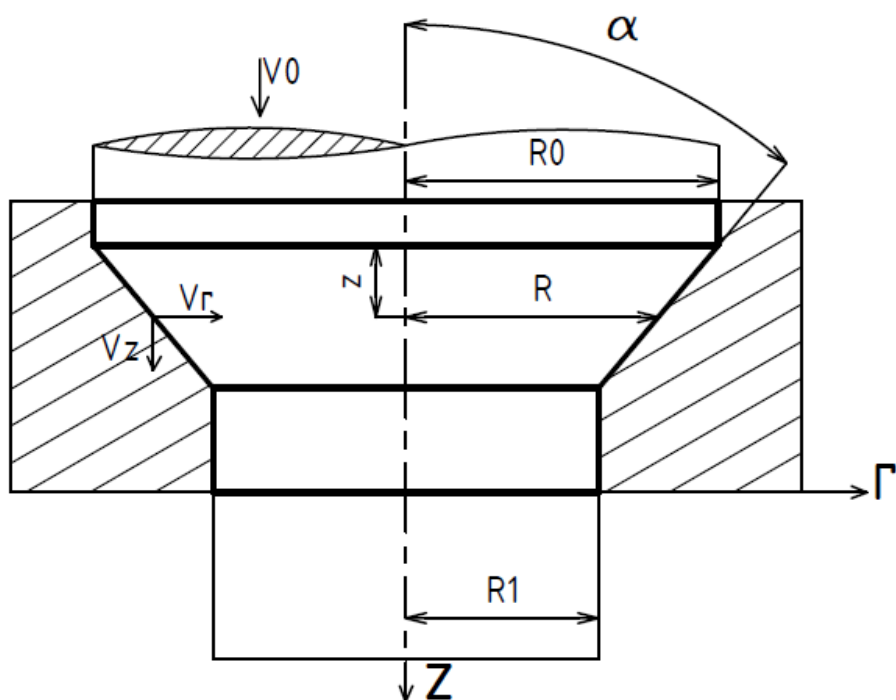


$$\dot{\varphi}_z = \frac{v}{h} [s^{-1}] \quad (1.9)$$

v rýchlosť baranu $[ms^{-1}]$
h vzťažná výška $[mm]$

Obr.1.26 – Geometrický model nabíjania

Dopredné pretlačovanie

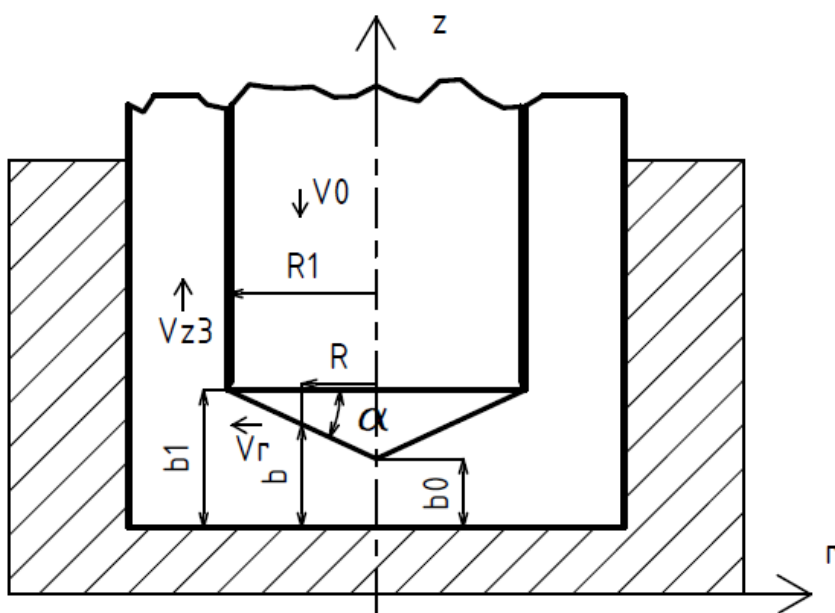


Obr. 1.27 – Geometrický model dopredného pretlačovania

Pre geometrický model na obrázku 1.27 platí vzťah pre okamžitú rýchlosť deformácie v smere osy z vzťah (1.10)

$$\dot{\phi}_z = 2 \cdot v_0 \frac{R_0^2}{R^3} \tan \alpha \quad (1.10)$$

Spätné pretlačovanie



Obr. 1.28 – Geometrický model spätného pretlačovania

Pre všeobecnú polohu pod čelom prietlačníku v polomere R je výška b spočítaná podľa vzťahu (1.11)

$$b = R \cdot \tan \alpha + b_0 \quad (1.11)$$

Pre zadaný geometrický model na obrázku 2.29 platí pre rýchlosť deformácie v ose z vzťah (1.12)

$$\dot{\varphi}_z = - \frac{v_0}{R \cdot \tan \alpha + b_0} \quad (1.12)$$

Odvodenie vzťahov pre rýchlosti deformácie nieje predmetom tejto práce a sú uvedené v [22].

2 ROZBOR VYRÁBANEJ SÚČASTI

Zadaná súčasť je kolíková koncovka, ktorá sa nachádza v rozdelovači automobilu. Jej hlavnou funkciou je vedenie elektrického prúdu a niesu na ňu kladené vysoké mechanické požiadavky. Materiál je technicky čistá meď ČSN 42 3001.1, ktorá sa taktiež označuje ako elektrovodná. Špeciálne požiadavky na kvalitu povrchu ani zvýšené geometrické tolerancie výkres neudáva. V nízkej sérii by bolo vďaka horeuvedeným faktom možné túto súčasť vyrobiť viacerými technológiami vrátane odlievania, obrábania a objemového tvárnenia. Smerodajnou požiadavkou je v tomto prípade výrobná séria 320 000 ks/rok. Výrobný výkres súčasti je v prílohe tejto práce.

- **Odlievanie**

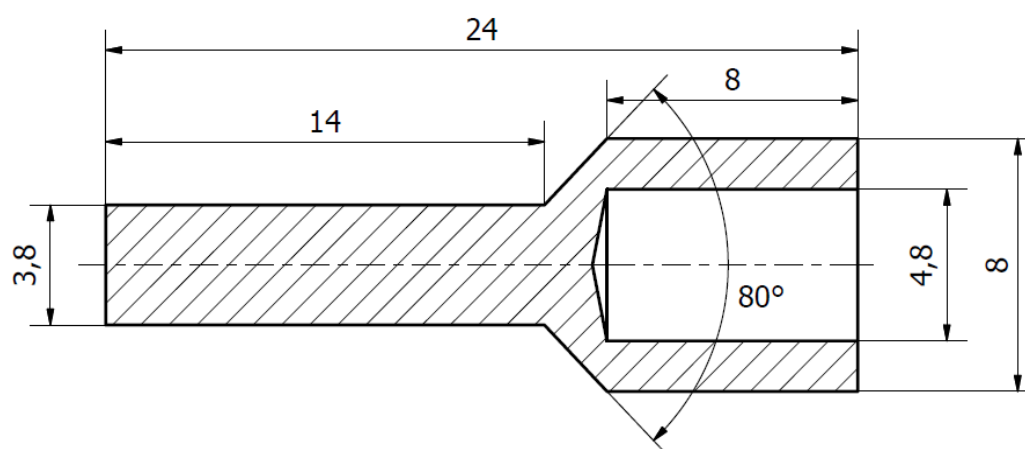
Táto technológia by sa mohla javiť výhodnou pri omnoho nižšej výrobnej sérii a pri podstatne zložitejšej súčasti, ktorá by inak bola iba veľmi ťažko vyrobiteľná. Tvar a rozmery súčasti však umožňujú vyrobiť súčasť omnoho výhodnejšie inými technológiami.

- **Obrábanie**

Výhodou technológie obrábania je, že odpadá potreba drahého nástrojového vybavenia a je možné použiť univerzálnejšie sústružnícke nožové držiaky a vymeniteľné britové dosky. Moderné sústružnícke centrá taktiež umožňujú delenie polotovaru priamo pri procese obrábania, preto by bolo možné zadanú súčasť obrobiť na jedno upnutie z celej dodanej tyče. Nevýhod trieskového obrábania je niekoľko. Jednou z nich je značný materiálový odpad, ktorý pri obrábaní vznikne. Ďalšou nespornou nevýhodou je nižšia výrobnosť než pri tvárnení. Najcharakteristickejším rozdielom sú rozdielne mechanické vlastnosti hotového výrobku v porovnaní s výrobkom, ktorý bol vyrobený tvárnením za studena z rovnakého materiálu.

- **Tvárnienie za studena**

Tvárnienie za studena umožňuje vyrobiť jednoduché rotačné súčasti rádovo v jednotkách sekúnd, preto je pre hromadnú výrobu najvhodnejšou. Taktiež má táto technológia za následok zmenu materiálovej štruktúry, s ktorou súvisí priaznivá zmena mechanických vlastností výrobku. Tvárnienie za studena sa taktiež riadi zákonom zachovania objemu, čo má za následok zpravidla nulový alebo minimálny odpad z polotovaru.



Obr.2.1 Rozmery vyrábanej súčasti – kolíkovej koncovky z medi podľa ČSN 42 3001.1

2.1 Materiál podľa ČSN 42 3001.1 [8, 13, 14, 23, 25]

Tento materiál je takzvaná elektrovodná, technicky čistá meď s obsahom 99,9% Cu. Je to všestranný materiál pre použitie v elektrotechnike a súčiastiach, ktoré majú požiadavku na vedenie elektrického prúdu. Obsahuje kyslík a preto je v prostredí s obsahom vodíka H_2 náchylný ku kyslíkovej krehkosti – redukcia oxidov Cu a vytvorenie H_2O v mikroštruktúre materiálu, čo má za následok krehkosť na hraniciach zŕn. Tento proces však nastáva pri teplotách vyšších ako $500^{\circ}C$. Kyslík taktiež zhoršuje zvariteľnosť. Existujú bezkyslíkaté alternatívy, ktoré nevýhody kyslíku eliminujú pri zachovaní veľmi dobre elektrickej vodivosti. Prítomnosť Fe nemá veľký vplyv na mechanické vlastnosti avšak už stopové množstvo robí tento materiál feromagnetickým. Tento materiál je málo vhodný na obrábanie. Pevnosť klesá pomerne rýchlo s rastúcou teplotou a celkovo tak ako je charakteristické pre čisté kovy má nízke mechanické vlastnosti. Materiálový list medi podľa ČSN 42 3001 je v prílohe č.2.

Tab. 2.1 – Chemické zloženie materiálu podľa ČSN 42 3001 [25]

| Chemické zloženie (hm%) | | | | |
|-------------------------|----------------|-----------|--------|---------|
| Cu | O ₂ | Pb | Ag | Spolu |
| min. 99,90 | max 0,06 | max. 0,05 | ako Cu | max 0,1 |

Tento materiál je veľmi vhodný na tvárnenie a medzi bežne dodávané polotovary patria tyče kruhového, štvorcového a šesťhranného prierezu, drôty, plechy, duté profily.

Tab. 2.2 – Vybrané fyzikálne vlastnosti materiálu podľa ČSN 42 3001 [15, 25]

| Veličina | Jednotka | Hodnota |
|---|---------------------|--------------|
| Hustota | g/cm^3 | 8,89 |
| Elektrická vodivosť | % IACS | 93,15 - 100 |
| Elektrická rezistivita | $\mu\Omega \cdot m$ | 0,017-0,0178 |
| Merná tepelná kapacita | J/(kg*K) | 385 |
| Youngov modul pružnosti pri $t=20^{\circ}C$ | Gpa | 108 |

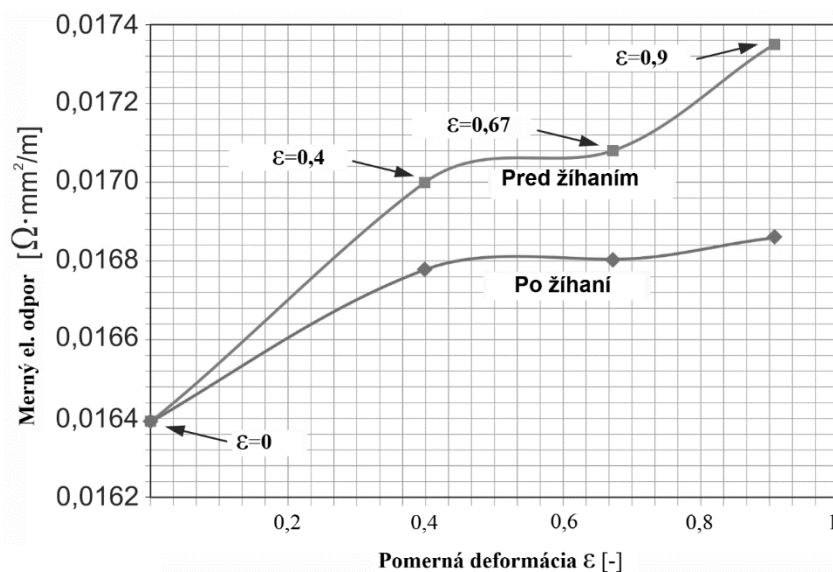
Tab 2.3 – Mechanické vlastnosti v dvoch rôznych stavoch tepelného spracovania[25]

| Stav | Medza pružnosti $R_{p0,2}$ [MPa] | Medza pevnosti R_m [MPa] | Ťažnosť [%] | Tvrdosť [HV] |
|----------|-------------------------------------|-------------------------------|----------------|-----------------|
| Vyžíhaný | 69 | 235 | 45 | 70 |
| Tvrдый | 365 | 395 | 4 | 120 |

Tab 2.4 – Niektoré označenia ekvivalentných materiálov v zahraničných normách [25]

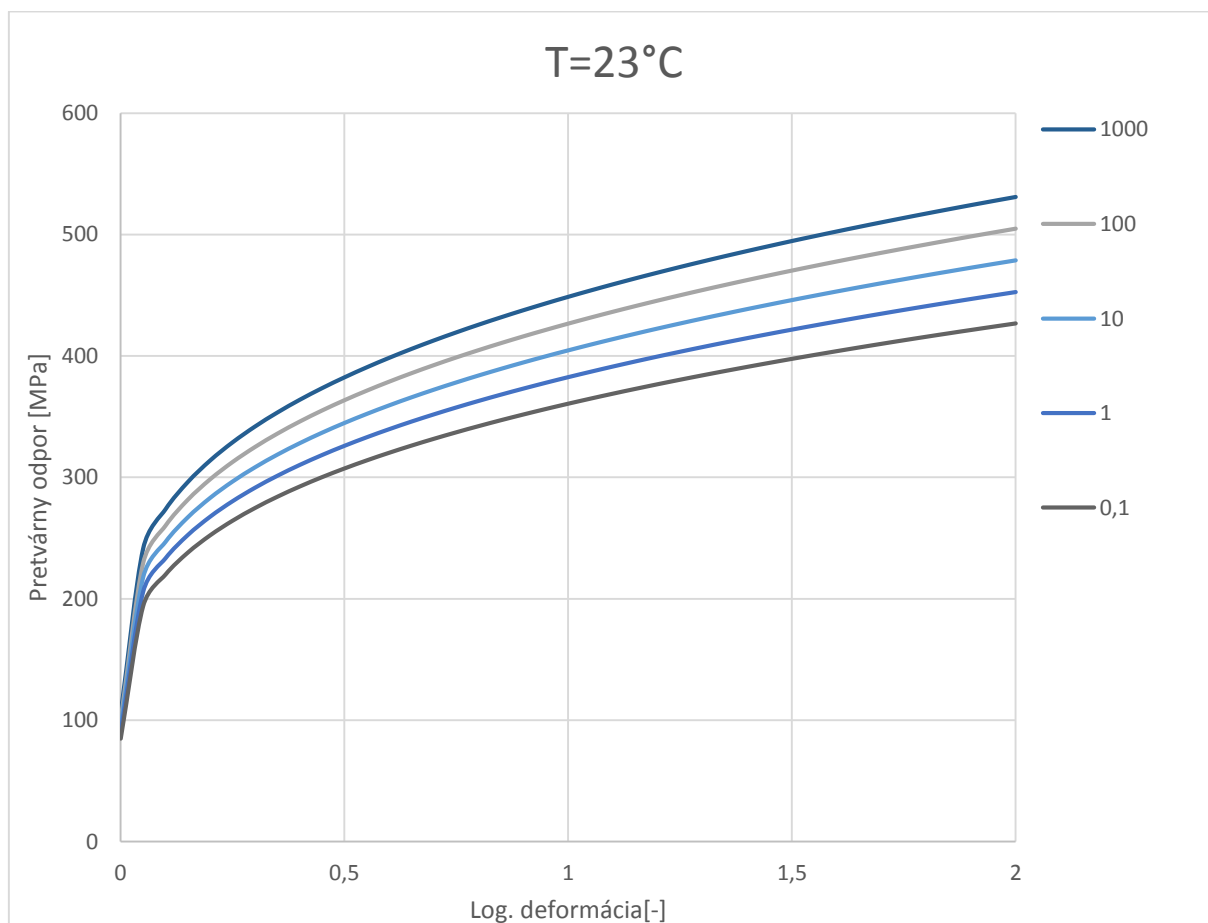
| ISO | ČSN | EN | DIN |
|--------|---------|--------|---------------|
| Cu-ETP | 42 3001 | CW004A | E-Cu57/E-Cu58 |

Tepelné spracovanie žihanie na odstránenie pnutí $150-250^{\circ}C$
 rekryštalizačné žihanie $400-650^{\circ}C$



Obr 2.2 – Závislosť elektrickej vodivosti na deformácii drôtu podľa ISO Cu-ETP
žiňanie na 260°C [24]

Graf na obrázku 3.2 ukazuje, že vodivosť s pretvorením mierne klesá, žiňaním je možné tento efekt zmierniť.



Obr. 2.3 – Graf závislosti prirodzeného pretvárneho odporu na deformácii podľa
Johnson-cookovho vzťahu pri konštantnej teplote 23°C

Pre výpočet pretvárných odporov bude použitý vzťah podľa Johnson-Cooka , ktorý okrem logaritmickéj deformácie zohľadňuje aj teplotu procesu a rýchlosť deformácie. Potrebné konštanty uvádzajú zdroje [8, 23]. Graf závislosti pretvárneho odporu na deformácii pre niekoľko rýchlostí deformácie je na obrázku 3.3. s-1

Tab. 2.5 – Konštanty do vzťahu Johnson-Cook pre materiály OFHC [23]

| | |
|------------------------------|---------|
| σ_0 | 90 MPa |
| B | 292 MPa |
| C | 0,025 |
| n | 0,31 |
| m | 1,09 |

Zhodnotenie

Súčasť bude, ako udáva zadanie, vyrobená objemovým tvárnením za studena s využitím pochodov pretlačovania a ubíjania. Touto technológiou bude možné dosiahnuť vysokú výrobnosť, priaznivé mechanické vlastnosti a maximálnu možnú úsporu materiálu.

3 VOLBA TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU

Výrobná technológia pretlačovania za studena je zremá už zo zadania, teda budú potrebné operácie dopredného a spätného pretlačovania a ubíjania. Pri volbe technologického postupu bude určený najvhodnejší sled operácií, rozmer polotovaru a počet krokov potrebných na vyrobenie súčasti. Pre niekoľko počiatočných návrhov budú spočítané pretvorenia a po zvolení najvhodnejšieho dopočítané deformačné odpory v jednotlivých operáciách. Tieto údaje sú kľúčové pre volbu stroja a nástrojov a pre ďalšie zhodnotenie výroby.

Pretože objemové tvárnenie sa riadi zákonom zachovania objemu, rozmery polotovaru, v tomto prípade dĺžka drôtu, sa vypočítajú z objemu hotového výrobku. Objem výrobku bol stanovený pomocou programu Autodesk Inventor 2017.

Objem

$$V = 473,1 \text{ mm}^3$$

Hmotnosť

$$m = \rho \times \frac{V}{1000} = 4,2 \text{ g}$$

$$\rho \quad \text{hustota} \quad [\text{g.cm}^{-3}]$$

Výška/dĺžka polotovaru

$$h = \frac{4 \times V}{\pi \times D_1^2} \quad (3.1)$$

| | | | |
|------|-------|-------------------|-----------------|
| Kde: | V | objem výrobku | $[\text{mm}^3]$ |
| | D_1 | priemer prístrihu | $[\text{mm}]$ |
| | h | dĺžka prístrihu | $[\text{mm}]$ |

3.1 Varianta 1 - polotovar s priemerom hlavy kolíku

V prvej možnosti bude uvažovaná výroba z polotovaru, ktorý má priemer rovný vonkajšiemu priemeru hlavy hotového kolíku. Táto voľba by odstránila potrebu operácie nabíjania hlavy kolíku. Výsledný počet operácií v tejto variante je 2.

$$\text{Východzí priemer polotovaru} \quad D_0 = 8_{-0,09}^0 \text{ mm}$$

Dĺžka ústrižku

$$h_0 = \frac{V}{S_0} = \frac{4 \times V}{\pi \times D_0^2} = \frac{4 \times 473,1}{\pi \times 8^2} = 9,4 \text{ mm} \quad (3.2)$$

| | | | |
|-----|-------|----------------------------|-----------------|
| Kde | V | objem prístrihu | $[\text{mm}^3]$ |
| | S_0 | obsah podstavy prístrihu | $[\text{mm}^2]$ |
| | D_0 | priemer podstavy prístrihu | $[\text{mm}]$ |

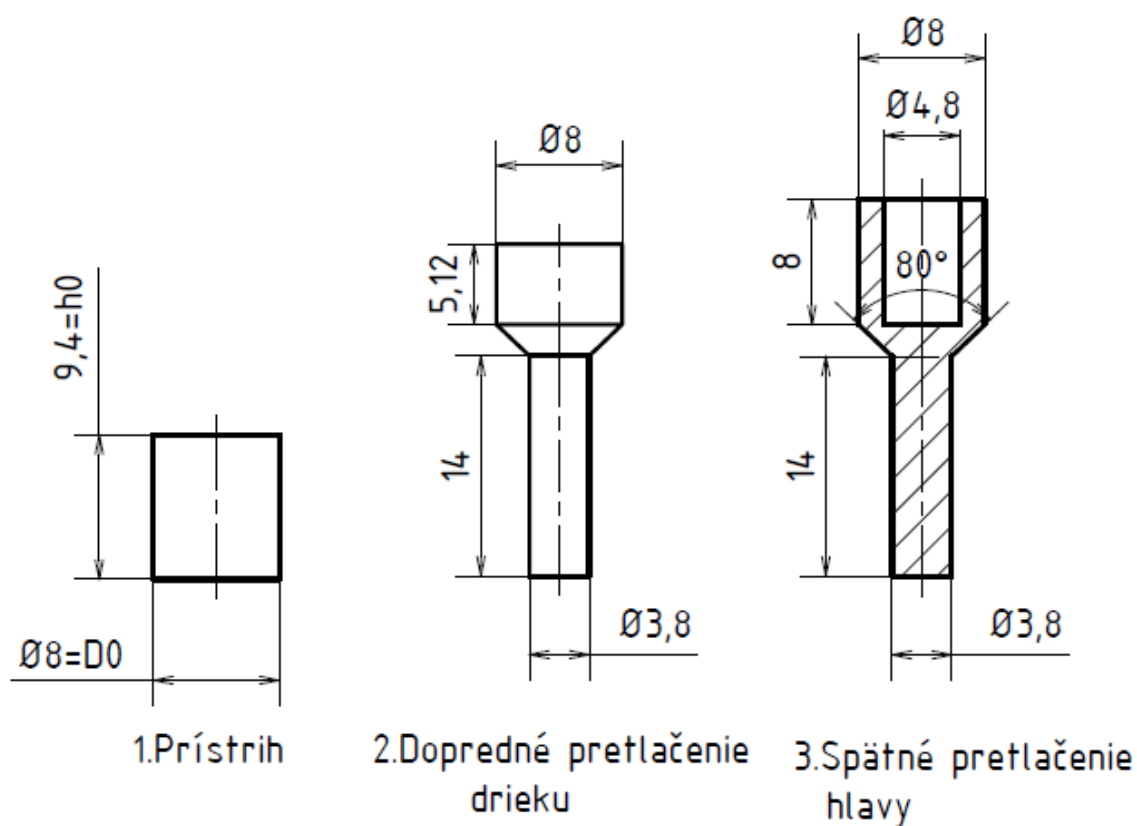
Výška hlavy pred spätným pretlačením h_1

$$h_1 = \frac{V - V_d}{S_0} = \frac{4 \times (V - V_d)}{\pi \times D_0^2} = \frac{4 \times (473,1 - 215,8)}{\pi \times 8^2} = 5,12 \text{ mm} \quad (3.3)$$

Kde

| | | |
|-------|--|-----------------|
| V_d | objem drieku | $[\text{mm}^3]$ |
| S_0 | obsah podstavy prístrihu | $[\text{mm}^2]$ |
| D_0 | priemer podstavy prístrihu (= priemer hlavy) | $[\text{mm}]$ |

Postup operácií je dopredné pretlačenie drieku a následné spätné pretlačenie hlavy kolíku – vid obr. 3.1.



Obr.3.1 – Postup operácií v prvej variante

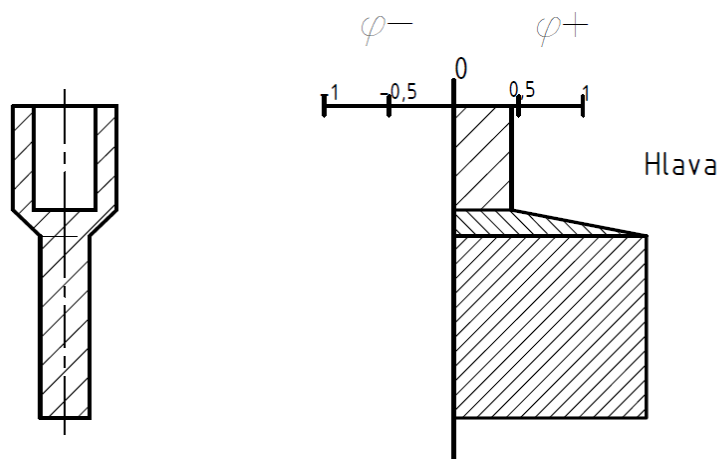
Všetky rozmery v priebehu všetkých operácií boli určené zo zákona zachovania objemu. Ďalej je potrebné spočítať logaritmické pretvorenia v jednotlivých častiach kolíku.

Driek

$$\varphi_{driek} = \ln \frac{D_0^2}{D_1^2} = \ln \frac{8^2}{3,8^2} = 1,489 \quad (3.4)$$

Hlava

$$\varphi_{hlava} = \ln \frac{D_0^2}{D_0^2 - d^2} = \ln \frac{8^2}{8^2 - 4,8^2} = 0,446 \quad (3.5)$$



Obr. 3.2 – Graficky znázornený priebeh skutočného pretvorenia v objeme telesa pre prvú variantu výroby

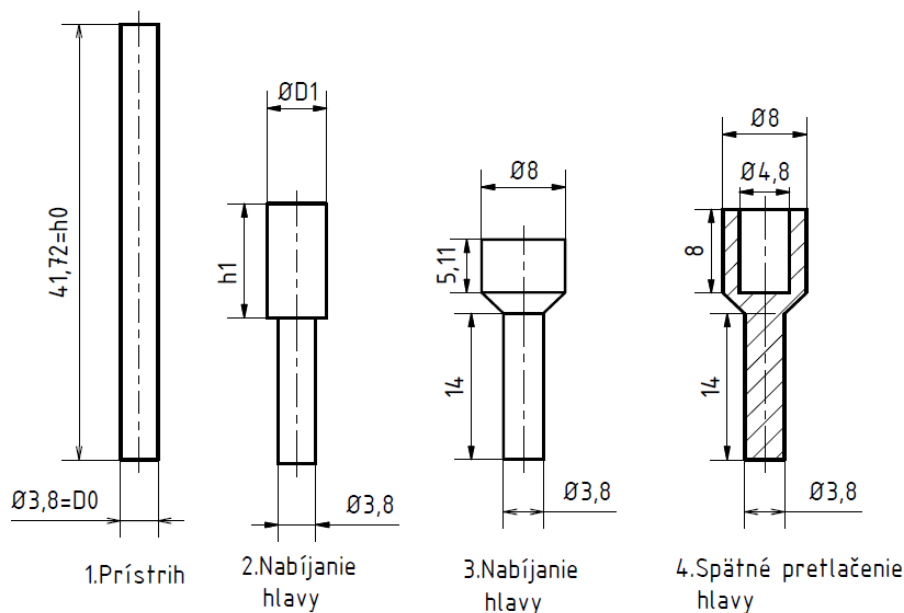
3.2 Varianta 2 – polotovár s priemerom drieku kolíku

Druhá možnosť počíta s polotovarom, ktorého východzí priemer sa rovná finálnemu priemeru drieku kolíku. V tejto variante odpadá potreba dopredného pretlačovania a tvárniť sa bude iba hlava – ubíjaním a spätným pretlačením.

Východzí priemer polotovaru $D_0 = 3,8 \text{ mm}$

Dĺžka ústrižku

$$h_1 = \frac{4 \times 437,1}{\pi \times x} = 41,72 \text{ mm} \quad (3.6)$$



Obr. 3.3 – Postup operácií v druhej variante

Prvý krok v druhej variante je ubíjanie východzieho priemeru na priemer hlavy. Z tohto dôvodu je potrebné urobiť kontrolu ubíjacieho pomeru, ktorý by nemal pri voľnom ubíjaní prekročiť hodnotu 2,5. Pri kontrole ubíjacieho pomeru musíme odrátať dĺžku drieku 14 mm, ktorá ostáva nepretvorená.

Nabíjací pomer pri nabíjaní hlavy na jednu operáciu

$$\lambda = \frac{h}{D_0} = \frac{h_{celk} - h_{hlava}}{D_0} = \frac{41,72 - 14}{3,8} = 7,3 \quad (3.7)$$

Nabíjací pomer je značne vysoký a preto bude potrebné zaradiť jednu alebo viac nabíjajúcich operácií, ktoré rozložia operáciu ubíjania hlavy na viac krokov tak, aby bolo možné kolík vyrobiť. Pri nabíjaní v dutine je možné nabíjací pomer zvýšiť v závislosti od pomeru D_1/D_0

Pomer priemerov

$$\frac{D_1}{D_0} = \frac{8}{3,8} = 2,1 \quad (3.8)$$

Literatúra udáva, že pri pomere $D_1/D_0 = 1,5$ je možné nabíjať s pomerom $\lambda = 3 \div 6$. Táto varianta bola založená na úspore operácií avšak nabíjanie hlavy by v konečnom dôsledku zvýšilo počet operácií na viac ako 4 pretože by bolo potrebné rozložiť nabíjací pomer na viac krokov.

3.3 Varianta 3 – optimalizovaný priemer polotovaru pre rovnomerné pretvorenie

Pretože prvá aj druhá možnosť ukazuje nežiadúce nerovnomerné pretvorenie v celom objeme súčasti, je potrebné toto pretvorenie upraviť. V tretej možnosti je vypočítaný optimálny priemer polotovaru D_0 pre podmienku rovnomerného pretvorenia drieku aj hlavy kolíku. Konečný tvar bude dosiahnutý tromi operáciami plus operáciou strihania drôtového polotovaru na špalíky. Operácia objemového tvárnenia bude dopredné pretlačenie drieku a ubíjanie a spätné pretlačenie hlavy.

Podmienka

$$\varphi_{hlavy} = \varphi_{drieku}$$

Logaritmické pretvorenie hlavy sa skladá z pretvorení pri operáciách ubíjania a spätného pretlačovania.

Dopredné pretlačenie drieku

$$\varphi_1 = \ln \frac{D_0^2}{D_1^2} = \ln \frac{D_0^2}{3,8^2} \quad (3.9)$$

Nabíjanie hlavy

$$\varphi_2 = \ln \frac{D_2^2}{D_0^2} = \ln \frac{8^2}{D_0^2} \quad (3.10)$$

Spätné pretlačovanie

$$\varphi_3 = \ln \frac{D_2^2}{D_2^2 - d^2} = \ln \frac{8^2}{8^2 - 4,8^2} \quad (3.11)$$

Dosadenie do podmienky rovnomerného pretvorenia

$$\varphi_1 = \varphi_2 + \varphi_3 \quad (3.12)$$

$$\ln \frac{D_0^2}{3,8^2} = \ln \frac{8^2}{D_0^2} + \ln \frac{8^2}{8^2 - 4,8^2} \quad (3.13)$$

Odlogaritmovanie

$$\frac{D_0^2}{3,8^2} = \frac{8^2}{D_0^2} \cdot \frac{8^2}{8^2 - 4,8^2} \quad (3.14)$$

Úpravou rovnice dostávame požadovaný optimálny východzí priemer polotvaru

$$D_0 = 6,16 \text{ mm} \quad (3.15)$$

Nasleduje, tak, ako v predošlých krokoch dopočítanie rozmerov v medzioperáciách zo zákona zachovania objemu a následné výpočty priebehu logaritmického pretvorenia v objeme vyrábaného kolíku, ktoré bude mať v tomto prípade rovnomerný priebeh.

Výška prístrihu h_0

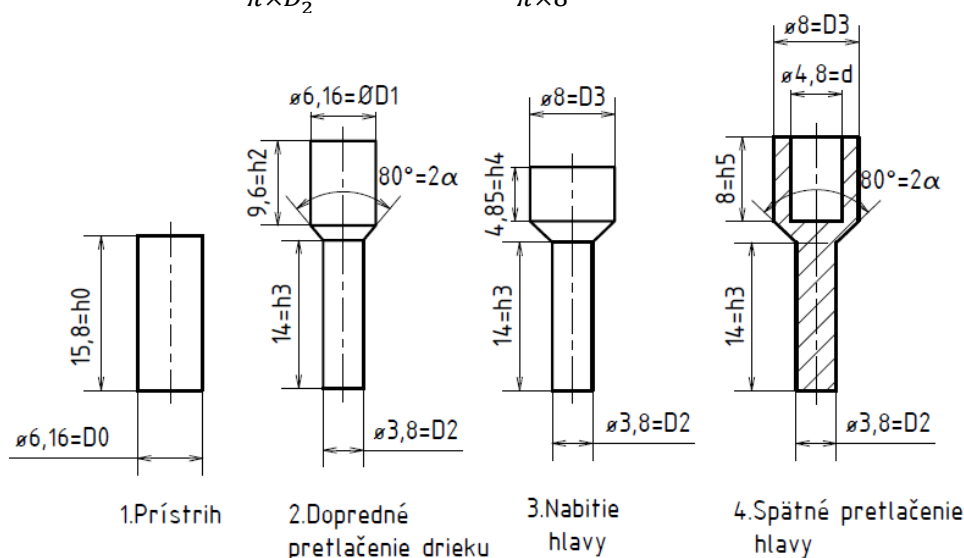
$$h_0 = \frac{4 \times 473,1}{\pi \times 6,16^2} = 15,8 \text{ mm} \quad (3.16)$$

Výška nepretvorenej časti po pretlačení drieku. V tejto operácii uvažujeme prechodovú časť medzi hlavou a drikom kuželového tvaru s vrcholovým uhlom 80° a výškou 1,4 mm. Tieto rozmery vychádzajú z konštrukcie prietlačnice a umožňujú nám ďalej počítať jednotlivé čiastkové objemy. Čiastkové objemy boli priebežne stanovované pomocou softwaru Autodesk Inventor Professional 2017.

$$h_2 = \frac{4 \times (V - V_{\text{driek} + \text{kužel}})}{\pi \times D_0^2} = \frac{4 \times (473,1 - 185,9)}{\pi \times 6,16^2} = 9,6 \text{ mm} \quad (3.17)$$

Výška nabitia plnej hlavy – uvažujeme kuželovú časť s rozmermi ako nahotovej súčasti – vrcholový uhol 80° a výška 2,5 mm

$$h_4 = \frac{4 \times (V - V_{\text{driek} + \text{kužel}})}{\pi \times D_2^2} = \frac{4 \times (473,1 - 230)}{\pi \times 8^2} = 4,85 \text{ mm} \quad (3.18)$$



Obr. 3.4 – Postup operácií v tretej variante $D_0 = 6,16 \text{ mm}$

Pretvorenie drieku

$$\varphi_{driek} = \ln \frac{D_0^2}{D_1^2} = \ln \frac{6,16^2}{3,8^2} = 0,966 \quad (3.19)$$

Pretvorenie hlavy – hlava je pretvorená v dvoch operáciách a to nabíjanie a spätné pretlačovanie.

- Nabíjanie

$$\varphi_{hlava1} = \ln \frac{D_2^2}{D_0^2} = \ln \frac{8^2}{6,16^2} = 0,523 \quad (3.20)$$

- Spätné pretlačovanie

$$\varphi_{hlava2} = \ln \frac{D_2^2}{D_2^2 - d^2} = \ln \frac{8^2}{8^2 - 4,8^2} = 0,446 \quad (3.21)$$

- Celkové pretvorenie hlavy

$$\varphi_{hlava} = \varphi_{hlava1} + \varphi_{hlava2} = 0,523 + 0,446 = 0,969 \quad (3.22)$$

- Porovnanie celkových pretvorení hlavy a drieku

$$\begin{aligned} \varphi_{driek} &= \varphi_{hlava} \\ 0,969 &\cong 0,966 \end{aligned} \quad (3.23)$$

Výpočty dokázali, že pretvorenia sú rovnaké v celom objeme súčasti a to vďaka optimálnej volbe počiatočného priemeru polotovaru.

3.4 Zhodnotenie a výber najvhodnejšej varianty

Boli uskutočnené 3 návrhy technologického postupu výroby súčasti, pričom prvé dva boli zvolené s ohľadom na minimálny počet operácií. Tieto varianty však majú za následok veľmi nerovnomerné pretvorenie v priebehu kolíku a teda aj rozdielne mechanické vlastnosti výrobku. Druhá varianta taktiež stráca výhodu menšieho počtu operácií, pretože je potrebných viacero nabíjajúcich operácií na pretvorenie hlavy z malého priemeru polotovaru. V tretej variante bol urobený výpočet optimálneho priemeru polotovaru s podmienkou rovnakého pretvorenia hlavy aj drieku kolíku. Táto varianta počíta s tromi operáciami objemového tvárnenia - dopredné pretlačovanie, nabíjanie a spätné pretlačovanie – a taktiež s operáciou odstrihnutia polotovaru – špalíku. Tento postup je ešte možné ďalej optimalizovať tak, aby priemer východzieho polotovaru bol štandardným priemerom dodávaným od firiem, ktoré s týmto materiálom obchodujú. Priemer $D_0=6,16$ bude teda vyrobený ďalšou operáciou nabíjania a to z priemeru východzieho polotovaru 6 mm. Táto operácia nebude mať vplyv na rovnomerné pretvorenie, pretože prebehne v celom objeme súčasti. Taktiež ňou bude vyplnená štvrtá pracovná operácia stroja, na ktorom bude súčasť vyrábaná. Postup operácií je schematicky znázornený na obrázku 3.5.

Východzí priemer polotovaru

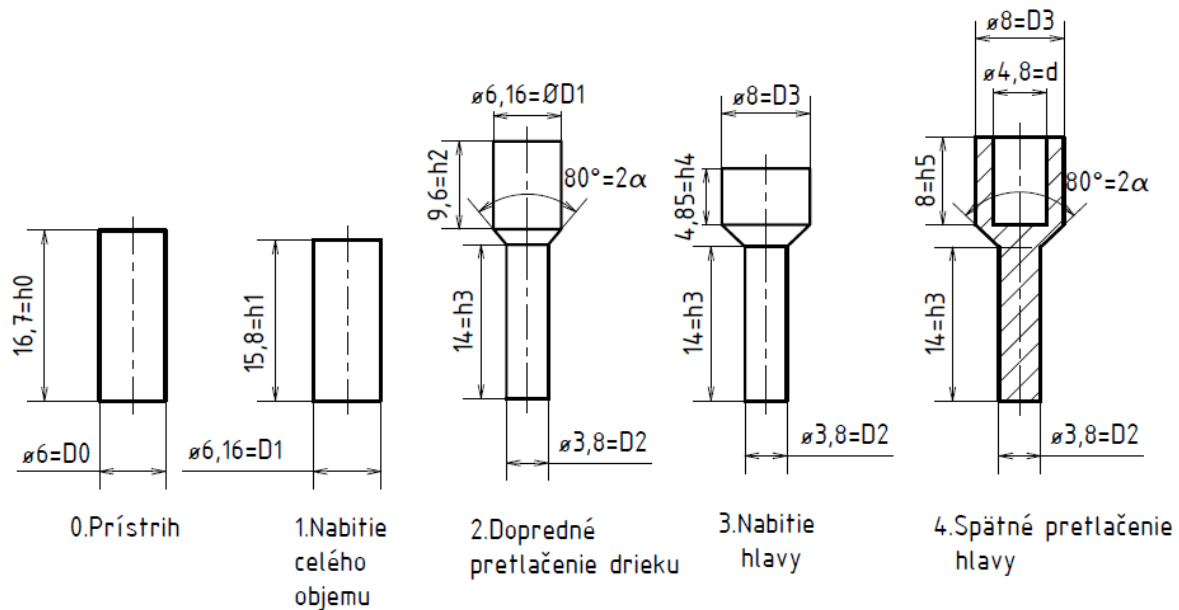
$$D_0 = 6_{-0,08}^0 \text{ mm} \quad (3.24)$$

Východzia výška polotovaru (prístrihu)

$$h_0 = \frac{4 \times 473,1}{\pi \times 6^2} = 16,7 \text{ mm} \quad (3.25)$$

V priebehu tvárnenia je potrebné zaistiť súososť polotovaru a lisovacieho nástroja. V prípade rovných čelných plôch by mohlo dôjsť k vybočeniu nástroja v niektorom kroku a nesústreďnosti výsledných priemerov, inak povedané k výrobe zmetkov. Stredenie nástroja je v tomto prípade dôležité najmä v poslednej operácii – spätnom pretlačení hlavy. Z tohto dôvodu je potrebné nástroje konštruovať so strediacim prvkom – kuželom na čele..

Schematický postup operácií pre finálnu variantu je na obrázku 3.5



Obr. 3.5 – Finálna varianta postupu operácií

Súčasť teda bude vyrobená na 4 operácie objemového tvárnenia a operáciu odstrihnutia polotovaru. Výsledné pretvorenie bude rovnaké ako vo variante číslo 3 zväčšené o pretvorenie v prvej operácii nabíjania.

Veľkosť logaritmického pretvorenia v 1. operácii

$$\varphi_1 = \ln \frac{D_1^2}{D_0^2} = \ln \frac{6,16^2}{6^2} = 0,053 \quad (3.26)$$

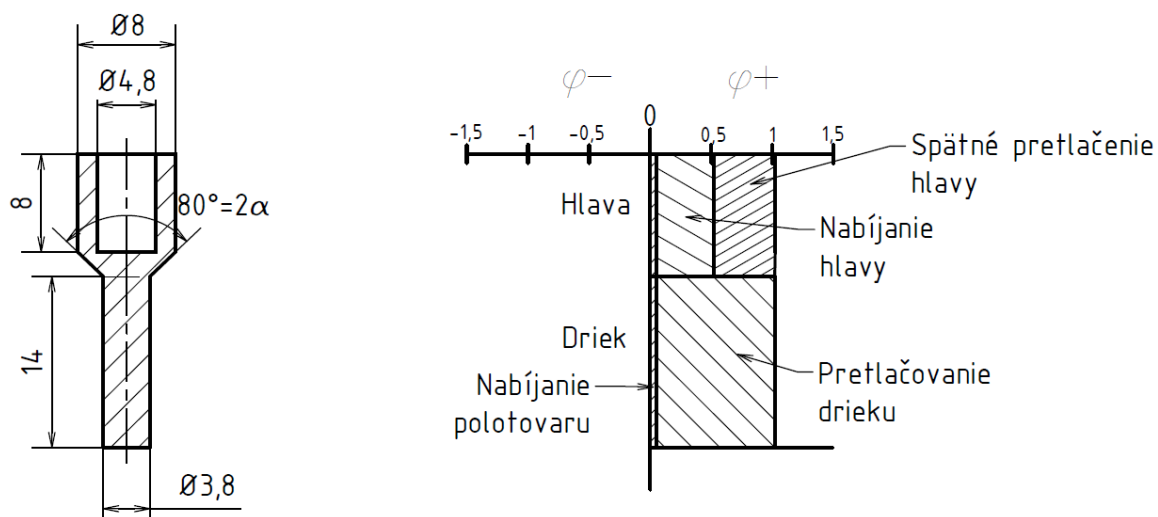
Graficky znázornený výsledný priebeh pretvorenia ukazuje minimálnu zmenu v celkovom pretvorení súčasti vplyvom zmeny priemeru polotovaru. Ďalšie logaritmické pretvoreniav jednotlivých krokoch už boli spočítané, takže ich stačí pričítať a vyniesť do grafu pretvorenia kolíku – obrázok 3.6.

$$\varphi_{driek} + \varphi_1 = \ln \frac{6,16^2}{6^2} + \ln \frac{6,16^2}{3,8^2} = 0,966 + 0,053 = 1,019 \quad (3.27)$$

$$\varphi_{hlava} + \varphi_1 = \varphi_{hlava1} + \varphi_{hlava2} + \varphi_1 =$$

$$\ln \frac{8^2}{6,16^2} + \ln \frac{8^2}{8^2 - 4,8^2} + \ln \frac{6,16^2}{6^2} =$$

$$0,523 + 0,446 + 0,053 = 1,022 \quad (3.28)$$



Obr. 3.6 Grafické znázornenie priebehu pretvorenia pre finálny výrobný postup

3.5 Výpočet pretvárnej sily a práce [4, 19, 20]

Pri výpočte pretvárnej sily bude zohľadnený materiálový model podľa **Jonson-Cooka**, ktorý zohľadňuje rýchlosť deformácie. Rýchlosť deformácie závisí okrem geometrie procesu aj na rýchlosti pohybu baranu stroja. Ako referenčná bude uvažovaná rýchlosť baranu stroja TPM 5 od firmy Šmeral.

Rýchlosť baranu stroja Šmeral TPM 5

$$v = \frac{\text{dráha}}{\text{čas}} = \frac{2 \times n \times h}{t \times 1000} = \frac{2 \times 125 \times 90}{60 \times 1000} = 0,375 \text{ m/s} \quad (3.29)$$

| | | | |
|------|---|--------------------------|-------|
| Kde: | v | rýchlosť baranu | [m/s] |
| | n | počet zdvihov baranu/min | [-] |
| | h | zdvih baranu | [mm] |
| | t | čas | [min] |

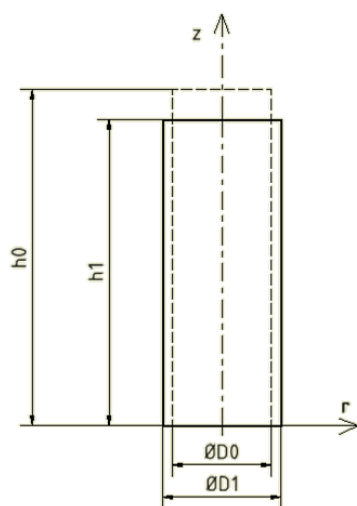
Homologická teplota

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (3.30)$$

| | | | |
|-----|----------------|--------------------|-----|
| Kde | | | |
| | T | teplota polotovaru | [K] |
| | T _r | referenčná teplota | [K] |
| | T _m | teplota tavenia | [K] |

Pretože v procese tvárnenia dochádza so stúpajúcou deformáciou k zahrievaniu polotovaru, bude uvažovaná teplota na konci procesu 250°C. Táto teplota bude v rovnomerných krokoch zohľadnená pri výpočte pretvárneho odporu.

4.5.1 Výpočet pretvárnej sily v 1.operácii



$$\begin{aligned} \varphi_1 &= 0,053 \\ h_0 &= 16,7 \text{ mm} \\ h_1 &= 15,8 \text{ mm} \\ D_0 &= 6 \text{ mm} \\ D_1 &= 6,16 \text{ mm} \end{aligned}$$

Obr. 3.7 – Geometrický model prvej operácie

Najväčšia rýchlosť deformácie

$$\dot{\varphi}_{z1} = \frac{v_z}{h_1} = \frac{0,375}{0,0158} = 23,73 \text{ s}^{-1} \quad (3.31)$$

Kde

| | | |
|----------------------|---|--------------------|
| $\dot{\varphi}_{z1}$ | najväčšia rýchlosť deformácie v axiálnom smere v 1.operácii | [s ⁻¹] |
| v_z | rýchlosť baranu | [m/s] |
| h_1 | vzťažná výška | [m] |

Homologická teplota procesu – pri teplote polotovaru 23°C

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} = \frac{296 - 293}{1356 - 293} = 0,00282 \quad (3.32)$$

Kde

| | | |
|----------------|--------------------|-----|
| T | teplota polotovaru | [K] |
| T _r | referenčná teplota | [K] |
| T _m | teplota tavenia | [K] |

Prirodzený pretvárný odpor podľa Johnson-Cooka

$$\sigma_{p1} = (\sigma_0 + B \times \varphi_1^n) \cdot \left(1 + C \times \ln \frac{\dot{\varphi}_1}{\dot{\varphi}_0}\right) \cdot [1 - (T^*)^m] =$$
$$(90 + 292 \times 0,053^{0,31}) \cdot \left(1 + 0,025 \times \ln \frac{23,73}{1}\right) \cdot [1 - (0,00282)^{1,09}] = 223,52 \text{ MPa} \quad (3.33)$$

Kde

| | | |
|----------------------|--|--------------------|
| φ_{z1} | logaritmická deformácia v 1. operácii | [-] |
| $\dot{\varphi}_{z1}$ | najväčšia rýchlosť deformácie v 1.operácii | [s ⁻¹] |
| T^* | homologická teplota | [-] |

Deformačný odpor podľa Siebela

$$\sigma_{z1} = \sigma_{p1} \cdot \left(1 + \frac{1 \times f \times D}{3 \times h}\right) = 223,52 \cdot \left(1 + \frac{0,05 \times 6,16}{3 \times 15,8}\right) = 224,97 \text{ MPa} \quad (3.34)$$

Kde

| | | |
|---------------|------------------------------|-------|
| f | súčiniteľ trenia | [-] |
| D,h | výsledný priemer, výška | [mm] |
| σ_{p1} | pretvárný odpor v 1.operácii | [MPa] |

Pretvárna sila

$$F_1 = \sigma_{z1} \times S = 224,97 \times \left(\frac{\pi \times 6,16^2}{4} \right) = 6\,704,6\,N = 6,7\,kN \quad (3.35)$$

Kde

| | | |
|---------------|-------------------------------|--------------------|
| σ_{z1} | deformačný odpor v 1.operácii | [kN] |
| S | plocha dotyku s nástrojom | [mm ²] |

Pretvárna práca – určíme ju ako súčin objemu súčasti a mernej pretvárnej práce

Merná pretvárna práca

Rovná sa obsahu plochy pod krivkou deformačný odpor-logaritmická deformácia a je možné ju s určitou chybou určiť numerickou integráciou po malých častiach.

$$A_j = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^n (\varphi_i - \varphi_{i-1}) \times \frac{(\sigma_i + \sigma_{i-1})}{2} [J \cdot mm^3] \quad (3.36)$$

Kde

| | | |
|-----------|--------------------------------------|-------|
| φ | pretvorenie v danom bode krivky | [-] |
| σ | deformačný odpor v danom bode krivky | [MPa] |

Pre prvú operáciu boli tieto hodnoty dosadené do vzťahu (4.36) a spočítané pomocou MS Excel

$$A_{j1} = 0,101\,J \cdot mm^3$$

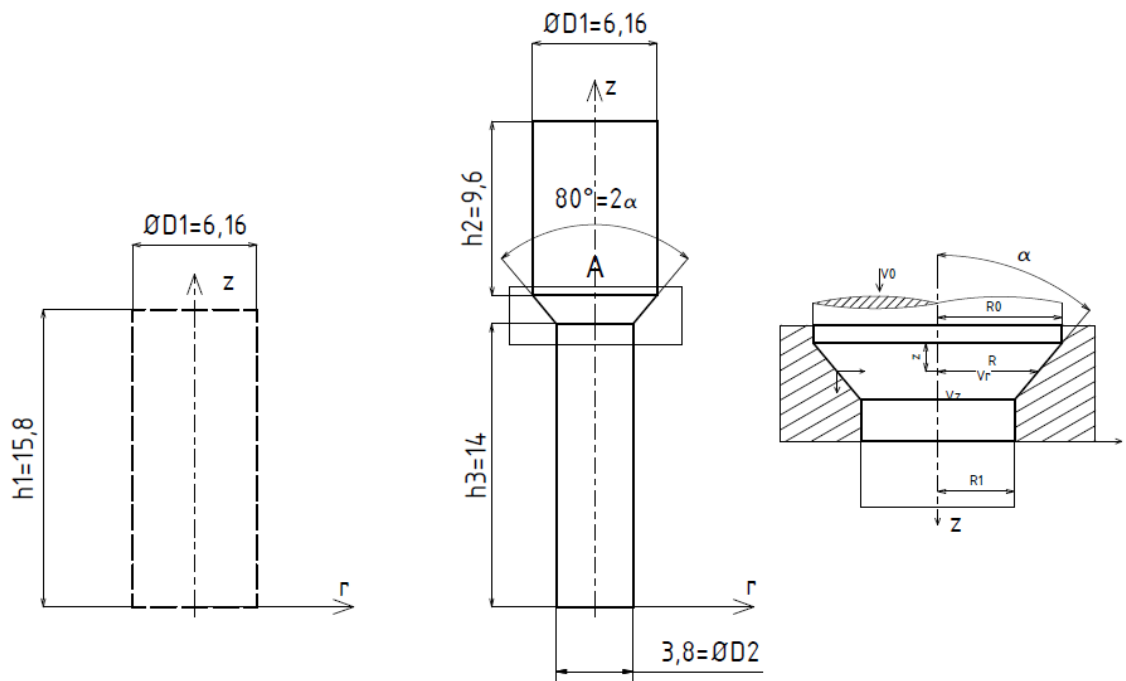
Pretvárna práca v prvej operácii sa potom určí podľa vzťahu (4.37)

$$A_1 = V \cdot A_{j1} = 473,1 \times 0,0101 = 4,78\,J \quad (3.37)$$

Kde

| | | |
|-------|-----------------------------|-----|
| F_1 | pretvárna sila v 1.operácii | [N] |
| h_0 | počiatočná výška | [m] |
| h_1 | konečná výška | [m] |

3.5.2 Výpočet pretvárnej sily v 2.operácii



Obr. 3.8 – Geometrický model 2.operácie

najväčšia rýchlosť deformácie

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_{z2} &= 2 \times v_z \times \frac{R_0^2}{R^3} \times \tan \alpha = 2 \times 0,375 \times \frac{\left(\frac{D_1}{2}\right)^2}{\left(\frac{D_2}{2}\right)^3} \times \tan 40 = \\ &= 2 \times 0,375 \times \frac{0,00308^2}{0,0019^3} \times \tan 40 = 870 \text{ s}^{-1} \end{aligned} \quad (3.38)$$

Kde

| | | |
|----------------------|---|--------------------|
| $\dot{\varphi}_{z2}$ | najväčšia rýchlosť deformácie v axiálnom smere v 2.operácii | [s ⁻¹] |
| v_z | rýchlosť baranu | [m/s] |
| R_0 | počiatočný polomer polotovaru | [m] |
| R | konečný polomer polotovaru | [m] |
| α | polovičný vrcholový uhol prietlačnice | [°] |

Homologická teplota – zvýšená na 50°C vplyvom predošlej operácie

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} = \frac{323 - 293}{1356 - 293} = 0,00282 \quad (3.39)$$

Kde

| | | |
|-------|--------------------|-----|
| T | teplota procesu | [K] |
| T_r | referenčná teplota | [K] |
| T_m | teplota tavenia | [K] |

Prirodzený pretvárny odpor podľa Johnson-Cooka – logaritmické pretvorenie musíme spočítať s predošlými operáciami

$$\sigma_{p2} = (\sigma_0 + B \times \varphi_2^n) \times \left(1 + C \times \ln \frac{\dot{\varphi}_{z2}}{\dot{\varphi}_0}\right) \times [1 - (T^*)^m] =$$

$$(90 + 292 \times (0,966 + 0,053)^{0,31}) \times \left(1 + 0,025 \times \ln \frac{870}{1}\right) \times [1 - (0,00282)^{1,09}] =$$

$$447,9 \text{ MPa} \quad (3.40)$$

Kde

| | | |
|----------------------|--|--------------------|
| φ_{z2} | logaritmická deformácia v 2. operácii | [-] |
| $\dot{\varphi}_{z2}$ | najväčšia rýchlosť deformácie v 2.operácii | [s ⁻¹] |
| T^* | homologická teplota | [-] |

Stredná hodnota pretvárneho odporu σ_{ps}

Je možné ju s určitou nepresnosťou určiť numerickou integráciou plochy pod krivkou pretvárneho odporu v závislosti na deformácii a následne vydelením logaritmickou deformáciou v danom kroku. Obsah plochy pod krivkou A_{j2} bol stanovený pomocou programu MS Excel.

$$\sigma_{ps2} = \frac{A_{j2}}{\varphi_2} = \frac{406,44}{0,966} = 420,7 \text{ MPa} \quad (3.41)$$

| | | | |
|-----|----------------|---|-----------------------|
| Kde | σ_{ps2} | stredná hodnota pretvárneho odporu v 2.operácii | [MPa] |
| | A_{j2} | merná pretvárna práca | [J.mm ⁻³] |
| | φ_2 | pretvorenie v druhej operácii | [MPa] |

Prepočet α na radiány – do vzťahu (3.43) treba dosadiť uhol v oblúkovej miere

$$\hat{\alpha} = \frac{\pi \times \alpha}{180} = \frac{\pi \times 40}{180} = 0,698 \text{ rad} \quad (3.42)$$

| | | | |
|-----|----------------|---------------------------------------|-------|
| Kde | $\hat{\alpha}$ | polovičný vrcholový uhol prietlačnice | [rad] |
| | α | polovičný vrcholový uhol prietlačnice | [°] |

Deformačný odpor – podľa Feldmanna

$$\begin{aligned}\sigma_{z2} &= \sigma_{ps2} \times \left[\left(1 + \frac{f_2}{\alpha} \right) \times \ln \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 + \frac{2}{3} \alpha \right] + 4f_2 \times \frac{D_2 \times h_3}{D_1^2} \times \sigma_{ps} + 4 \times f_1 \frac{h_2}{D_1} \times \sigma_{p1} \\ &= 420,7 \times \left[\left(1 + \frac{0,05}{\frac{\pi \times 40}{180}} \right) \times \ln \left(\frac{6,16}{3,8} \right)^2 + \frac{2}{3} \frac{\pi \times 40}{180} \right] + 4 \times 0,05 \times \frac{3,8 \times 14}{6,16^2} \times 420,7 + \\ &\quad 4 \times 0,05 \times \frac{9,6}{6,16} \times 223,52 = 631,12 + 117,8 + 69,67 = 818,6 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (3.43)$$

Kde

| | | |
|----------------|---------------------------------------|-------|
| σ_{p1} | pretvárný odpor v hlavovej časti | [MPa] |
| σ_{ps2} | stredná hodnota pretvárneho odporu | [MPa] |
| $f_{1,2}$ | súčiniteľ trenia (=0,05) | [-] |
| $\hat{\alpha}$ | polovičný vrcholový uhol prietlačnice | [rad] |

Pretvárna sila

$$F_2 = \sigma_{z2} \times S = 818,6 \times \frac{\pi \times D_1^2}{4} = 818,6 \times \frac{\pi \times 6,16^2}{4} = 24\,395,9 \text{ N} = 24,4 \text{ kN} \quad (3.44)$$

Kde

| | | |
|----------------|-------------------------------|--------------------|
| σ_{z2} | deformačný odpor v 2.operácii | [N] |
| S | plocha dotyku s nástrojom | [mm ²] |
| D ₁ | priemer hlavy v bode dotyku | [mm] |

Merná pretvárna práca

$$A_{j2} = \sigma_{ps2} \times \varphi_2 = 420,7 \times 0,966 \times 10^{-3} = 0,406 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3} \quad (3.45)$$

Kde

| | | |
|----------------|--|-------|
| σ_{ps2} | stredná hodnota pretvárneho odporu v 2. operácii | [MPa] |
| φ_2 | logaritmické pretvorenia v 2.operácii | [-] |

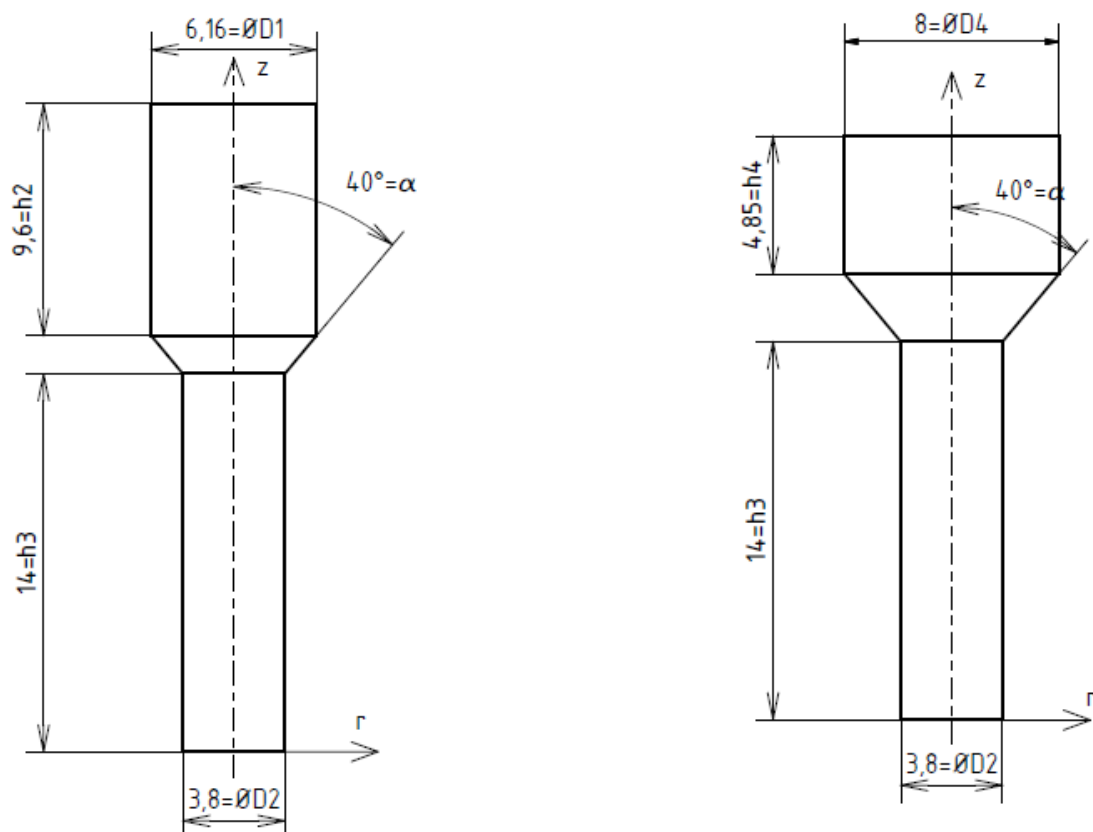
Pretvárna práca

$$A_2 = A_{j2} \cdot V_{driek} = 0,406 \cdot 185,9 = 75,4 \text{ J} \quad (3.46)$$

Kde

| | | |
|-------------|--|----------------------|
| A_{j2} | merná pretvárna práca v 2. operácii | [J.mm ³] |
| V_{driek} | objem pretlačovanej časti (určeny pomocou SW Inventor) | [mm ³] |

3.5.3 Výpočet pretvárnej sily v 3. operácii



Obr. 3.9 – Geometrický model 3.operácie

Najväčšia rýchlosť deformácie

$$\dot{\varphi}_{z3} = \frac{v_z}{h_4} = \frac{0,375}{0,00485} = 77,32 \text{ s}^{-1} \quad (3.47)$$

| | | | |
|-----|----------------------|---|--------------------|
| Kde | $\dot{\varphi}_{z3}$ | najväčšia rýchlosť deformácie v axiálnom smere v 1.operácii | [s ⁻¹] |
| | v_z | rýchlosť baranu | [m/s] |
| | h_4 | vzťažná výška | [m] |

Homologická teplota procesu – zvýšená na 150°C

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} = \frac{423 - 293}{1356 - 293} = 0,1248 \quad (3.48)$$

| | | | |
|-----|-------|--------------------|-----|
| Kde | T | teplota polotovaru | [K] |
| | T_r | referenčná teplota | [K] |
| | T_m | teplota tavenia | [K] |

Prirodzený pretvárný odpor podľa Johnson-Cooka

$$\sigma_{p3} = (\sigma_0 + B \times \varphi_3^n) \times \left(1 + C \times \ln \frac{\dot{\varphi}_{z3}}{\dot{\varphi}_0}\right) \times [1 - (T^*)^m] =$$
$$(90 + 292 \times (0,523 + 0,053)^{0,31}) \times \left(1 + 0,025 \times \ln \frac{77,32}{1}\right) \times [1 - (0,1248)^{1,09}]$$
$$= 379,7 \text{ MPa} \quad (3.49)$$

Kde

| | | |
|----------------------|---|--------------------|
| φ_{z3} | logaritmická deformácia v 3. operácii | [-] |
| $\dot{\varphi}_{z3}$ | najväčšia rýchlosť deformácie v 3. operácii | [s ⁻¹] |
| T^* | homologická teplota | [-] |

Deformačný odpor podľa Siebela

$$\sigma_{z3} = \sigma_{p3} \cdot \left(1 + \frac{1 \times f \times D}{3 \times h}\right) = 379,7 \times \left(1 + \frac{0,05 \times 8}{3 \times 4,85}\right) = 390,13 \text{ MPa} \quad (3.50)$$

Kde

| | | |
|---------------|-------------------------------|-------|
| f | súčiniteľ trenia | [-] |
| D, h | výsledný priemer, výška | [mm] |
| σ_{p3} | pretvárný odpor v 3. operácii | [MPa] |

Pretvárna sila

$$F_3 = \sigma_{z3} \cdot S = 390,13 \times \left(\frac{\pi \times 8^2}{4}\right) = 19\,610,2 \text{ N} = 19,6 \text{ kN} \quad (3.51)$$

Kde

| | | |
|---------------|--------------------------------|--------------------|
| σ_{z3} | deformačný odpor v 3. operácii | [MPa] |
| S | plocha dotyku s nástrojom | [mm ²] |

Stredná hodnota σ_{ps3}

$$\sigma_{ps3} = \frac{\sigma_{p2} + \sigma_{p3}}{2} = \frac{447,9 + 379,7}{2} = 413,8 \text{ MPa} \quad (3.52)$$

Merná pretvárna práca

$$A_{j3} = \sigma_{ps3} \times \varphi_3 = 413,8 \times 0,523 \times 10^{-3} = 0,216 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3} \quad (3.53)$$

Kde

| | | |
|----------------|---|-------|
| σ_{ps3} | stredná hodnota pretvárneho odporu | [MPa] |
| φ_3 | log. pretvorenie v 3. operácii (=0,523) | [-] |

Pretvárná práca

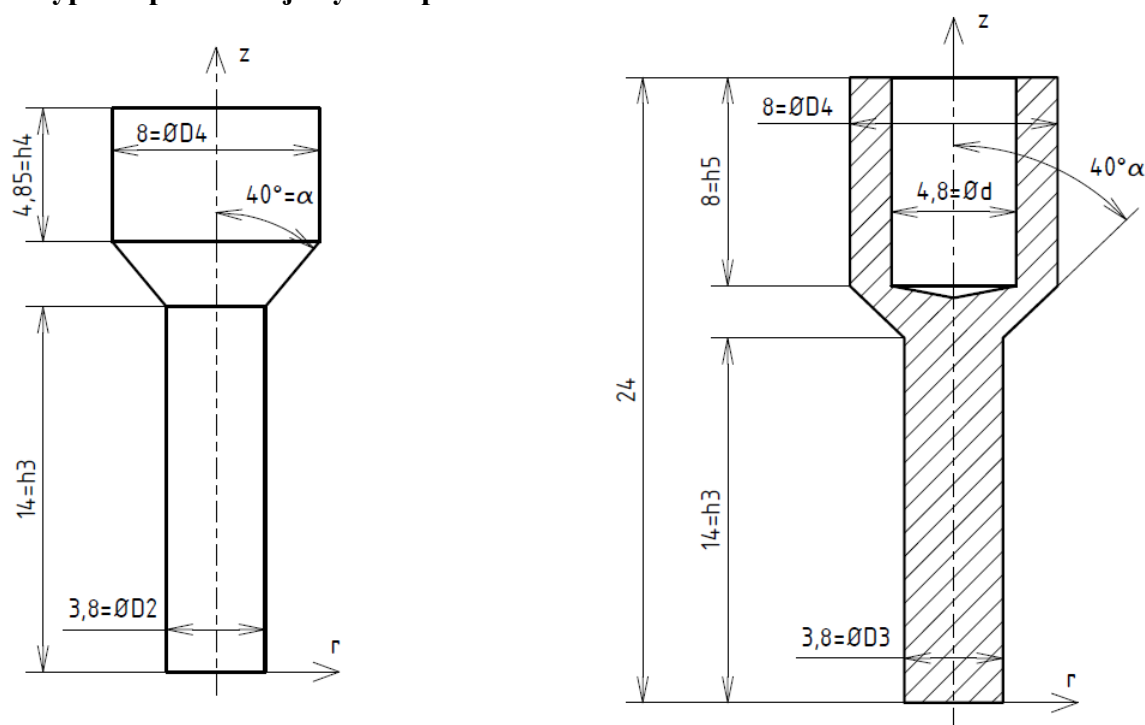
$$A_3 = A_{j3} \cdot V_{hlava} = 0,216 \cdot 287 = 61,9 \text{ J} \quad (3.54)$$

Kde

A_{j3} merná pretvárná práca v 3.operácii [$\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}$]

V_{hlava} objem hlavy [mm^{-3}]

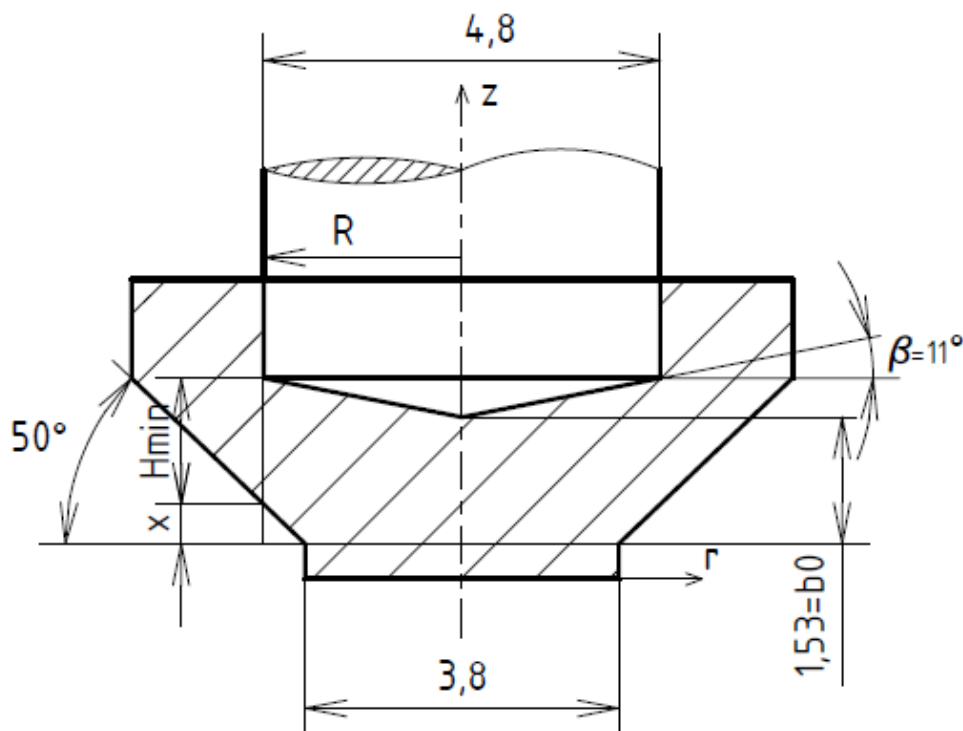
3.5.4 Výpočet pretvárnej sily v 4.operácii



Obr. 3.10 – Geometrický model 4. operácie

Najväčšia rýchlosť deformácie v 4.operácii

V tejto operácii je potrebné urobiť 2 výpočty a to pre $R=0$, kde je pre všeobecný vzorec rýchlosť pretvorenia pre spätné pretlačovanie najvyššia a následne v mieste H_{\min} kde sa, kvôli tvaru súčasti opäť znižuje plocha, cez ktorú tečie materiál.



Obr 3.11 (vľavo) – Geometrický model pre výpočet $\dot{\varphi}_{z4max}$ v 4.operácii

Rýchlosť v ose výrobku $\dot{\varphi}_{zR0}$

$$\dot{\varphi}_{zR0} = \frac{v_z}{R \times \tan \beta + b_0} = \frac{0,375}{0 \times \tan 11 + 0,00153} = 245,09 \text{ s}^{-1} \quad (3.55)$$

Kde

| | | |
|-----------------------|---|---------------------|
| $\dot{\varphi}_{zR0}$ | rýchlosť deformácie v axiálnom smere v 4.operácii pre R=0 | [s ⁻¹] |
| v_z | rýchlosť baranu | [ms ⁻¹] |
| b_0 | výška dna prietlačku | [m] |
| β | uhol na čele prietlačníku | [°] |
| R | polomer – akutálna poloha (pre R=0 je rýchlosť maximálna) | [m] |

$$H_{min} = R \times \tan \beta + b_0 - \left(\frac{d - D_3}{2} \right) \times \tan 50 = 2,4 \times \tan 11 + 1,53 - 0,5 \times \tan 50 = 1,4 \text{ mm} \quad (3.56)$$

Kde

| | | |
|---------|--|------|
| R | polomer – akutálna poloha | [mm] |
| β | uhol na čele prietlačníku | [°] |
| b_0 | výška dna prietlačku | [mm] |
| d | vnútorný priemer diery – vid obr. 4.10 | [mm] |
| D_3 | priemer drieku – vid obr. 4.10 | [mm] |

Rýchlosť v najmenšom priereze pod prietlačníkom H_{min}

$$\dot{\varphi}_{zHmin} = \frac{v_z}{H_{min}} = \frac{0,375}{0,0014} = 267 \text{ s}^{-1} \quad (3.57)$$

Kde

| | | |
|-----------|--------------------------------|--------------------|
| v_z | rýchlosť nástroja | $[\text{ms}^{-1}]$ |
| H_{min} | najmenší prierez pod nástrojom | $[\text{mm}]$ |

Pre výpočet najväčšieho pretvárneho odporu v 4.operácii bude vo vzťahu Johnson-Cook použitá najväčšia vypočítaná hodnota, teda $\varphi_{z4} = \varphi_{zHmin} = 267 \text{ s}^{-1}$

Homologická teplota procesu – zvýšená na 200°C

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} = \frac{473 - 290}{1356 - 290} = 0,1717 \quad (3.58)$$

Kde

| | | |
|-------|--------------------|--------------|
| T | teplota polotovaru | $[\text{K}]$ |
| T_r | referenčná teplota | $[\text{K}]$ |
| T_m | teplota tavenia | $[\text{K}]$ |

Prirodzený pretvárný odpor podľa Johnson-Cooka

$$\begin{aligned} \sigma_{p4} &= (\sigma_0 + B \times \varphi_4^n) \times \left(1 + C \times \ln \frac{\dot{\varphi}_{z4}}{\dot{\varphi}_0}\right) \times [1 - (T^*)^m] = \\ &= (90 + 292 \times (0,446 + 0,523 + 0,053)^{0,31}) \times \left(1 + 0,025 \times \ln \frac{267}{1}\right) \times [1 - (0,1717)^{1,09}] \\ &= 373,5 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (3.59)$$

Kde

| | | |
|----------------------|---|-------------------|
| φ_{z4} | celková logaritmická deformácia v 4. operácii | $[-]$ |
| $\dot{\varphi}_{z4}$ | najväčšia rýchlosť deformácie v 4.operácii | $[\text{s}^{-1}]$ |
| T^* | homologická teplota | $[-]$ |

Deformačný odpor podľa Siebela

$$\begin{aligned} \sigma_{z4} &= 1,152 \cdot \sigma_{p4} \cdot \frac{D^2}{d^2} \cdot \left(\log \frac{D^2}{D^2 - d^2} + \frac{D^2}{D^2 - d^2} \cdot \log \frac{D^2}{d^2} + \log \frac{d^2}{D^2 - d^2} \right) = \\ &= 1,152 \cdot 373,5 \cdot \frac{8^2}{4,8^2} \cdot \left(\log \frac{8^2}{8^2 - 4,8^2} + \frac{8^2}{8^2 - 4,8^2} \cdot \log \frac{8^2}{4,8^2} + \log \frac{4,8^2}{8^2 - 4,8^2} \right) = 761,56 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (3.60)$$

Kde

| | | |
|---------------|------------------------------|----------------|
| σ_{p4} | pretvárný odpor v 4.operácii | $[\text{MPa}]$ |
| D | vonkajší priemer prietlačky | $[\text{mm}]$ |
| d | vnútorný priemer prietlačky | $[\text{mm}]$ |

Pretvárna sila

$$F_4 = \sigma_{z4} \times S = 761,56 \times \left(\frac{\pi \times 4,8^2}{4} \right) = 13\,780,9 \text{ N} = 13,8 \text{ kN} \quad (3.60)$$

Kde

σ_{z4} deformačný odpor v 4.operácii [MPa]
 S plocha dotyku s nástrojom [mm²]

Stredná hodnota σ_{ps4}

$$\sigma_{ps4} = \frac{\sigma_3 + \sigma_4}{2} = \frac{379,7 + 373,5}{2} = 376,6 \text{ MPa} \quad (3.61)$$

Merný pretvárný odpor

$$A_{j4} = \sigma_{ps4} \times \varphi_4 = 376,6 \times 0,446 \times 10^{-3} = 0,166 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3} \quad (3.62)$$

Pretvárna práca

$$A_4 = A_{j4} \cdot V_{hlava} = 0,166 \cdot 287 = 47,56 \text{ J} \quad (3.63)$$

Kde

A_{j4} merná pretvárna práca v 4.operácii [J · mm⁻³]
 V_{hlava} objem hlavy [mm³]

3.6 Volba stroja a nástrojov

Po spočítaní pretvárných síl a prác v jednotlivých operáciách sa určí celková sila a práca a následne je možné spraviť kontrolu, či je vybraný stroj na danú operáciu dostačujúci.

Celková pretvárna sila

$$\begin{aligned} F_c &= F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = \\ &6,7 + 24,4 + 19,6 + 13,8 = \\ &64,5 \text{ kN} \end{aligned} \quad (3.64)$$

Kde $F_{1,2,3,4}$ čiastkové pretvárne sily [kN]

Celková pretvárna práca

$$\begin{aligned} A_c &= A_1 + A_2 + A_3 + A_4 = \\ &4,78 + 75,4 + 61,9 + 47,56 = \\ &189,64 \text{ J} \end{aligned} \quad (3.65)$$

Kde $A_{1,2,3,4}$ čiastkové pretvárne práce [J]

Potrebný výkon stroja

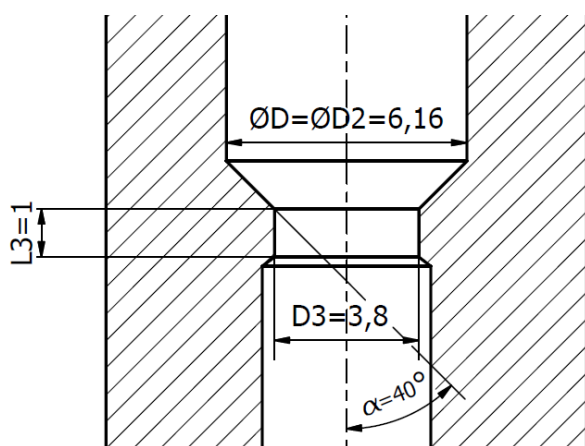
Celková pretvárna práca je práca na jeden zdvih baranu stroja. Potrebný výkon stroja sa spočíta tak, že sa vynásobí práca na jeden zdvih počtom zdvihov za minútu a vydolí 60, a teda výsledná hodnota je práca v Jouloch za sekundu – výkon.

$$P_C = \frac{n \times A_c}{t} = \frac{125 \times 189,64}{60} = 394,6 \text{ W} \quad (3.66)$$

| | | | |
|-----|-------|-------------------------|-----|
| Kde | A_c | celková pretvárná práca | [J] |
| | n | počet zdvihov baranu | [-] |
| | t | čas | [s] |

3.6.1 Výpočet radiálneho tlaku v prietlačnici 2. operácie [4]

Určenie radiálneho tlaku je potrebné pre určenie konštrukcie prietlačnice – zistenie potreby bandážovania, prípadne počet objímok.



Obr. 4.12 – Geometrický model prietlačnice

Stredná hodnota pretvárného odporu σ_{PS}

$$\sigma_{ps2} = \frac{A_{j2}}{\varphi_2} = \frac{406,44}{0,966} = 420,7 \text{ MPa} \quad (3.67)$$

| | | | |
|-----|----------------|---|-----------------------|
| Kde | σ_{ps2} | stredná hodnota pretvárného odporu v 2.operácii | [MPa] |
| | A_{j2} | merná pretvárná práca v 2.operácii | [J.mm ⁻³] |
| | φ_2 | pretvorenie v druhej operácii | [MPa] |

Výpočet napätia na vstupe do kužeľovej časti prietlačnice σ_{p2}

$$\sigma_{p2} = \sigma_{PS} \left[\left(\frac{\sigma_{P3}}{\sigma_{PS}} \times 4 \times f_3 \frac{L_3}{D_3} + \frac{\tan \alpha}{f_2} + 1 \right) \times \left(\frac{D_2}{D_3} \right)^{\frac{2 \times f_2}{\tan \alpha}} - \frac{\tan \alpha}{f_2} - 1 \right] =$$

$$420,7 \left[\left(\frac{420,7}{341,2} \times 4 \times 0,05 \times \frac{1}{3,8} + \frac{\tan 40}{0,05} + 1 \right) \times \left(\frac{6,16}{3,8} \right)^{\frac{2 \times 0,05}{\tan 40}} - \frac{\tan 40}{0,05} - 1 \right] =$$

$$474,07 \text{ MPa} \quad (3.68)$$

| | | | |
|-----|---------------|---|-------|
| Kde | σ_{PS} | stredná hodnota pretvárného odporu v 2.operácii | [MPa] |
| | σ_{P3} | pretvárný odpor v očku | [MPa] |
| | L_3 | dĺžka kalibračného očka | [mm] |

| | | |
|-----------|---------------------------------------|------|
| D_3 | priemer kalibračného očka | [mm] |
| α | polovičný vrcholový uhol prietlačnice | [°] |
| D_2 | priemer vstupu do kuželovej časti | [mm] |
| $f_{2,3}$ | súčinitele trenia (2-kužel, 3-očko) | [-] |

Výpočet osového napätia v zásobníku vo vzdialenosti „z“ nad vstupom do kuželovej časti

- za predpokladu že $z = L_1 = 8,6$, obdržíme napätie v mieste vstupu do prietlačnice
- Poissonova konštanta pre med' $\mu = 0,33$

$$\sigma_z = \sigma_{\rho_2} \times e^{\frac{\mu}{1-\mu} \times \frac{4 \times f_1}{D_1} \times z} = 474,07 \times e^{\frac{0,33}{1-0,33} \times \frac{4 \times 0,05}{6,16} \times 8,6} =$$

$$474,07 \cdot 1,1474 = 543,95 \text{ MPa} \quad (3.69)$$

| | | | |
|-----|-------------------|--|-------|
| Kde | σ_{ρ_2} | napätie na vstupe do kuželovej časti | [MPa] |
| | μ | poissonova konštanta | [-] |
| | f_1 | súčiniteľ trenia v zásobníku | [-] |
| | D_1 | priemer zásobníku | [mm] |
| | z | vzdialenosť od vstupu do kuželovej časti | [mm] |

Výpočet radiálneho napätia na vstupe do zásobníku prietlačnice

$$\sigma_r = \frac{\mu}{1-\mu} \times \sigma_z = \frac{0,33}{1-0,33} \times 543,95 = 267,92 \text{ MPa} \quad (3.70)$$

| | | | |
|-----|------------|--|-------|
| Kde | σ_z | osové napätie v mieste vstupu do zásobníku | [MPa] |
| | μ | poissonova konštanta | [-] |

Pri tejto hodnote radiálneho tlaku v prietlačnici nieje potrebné používať objímku na spevnenie prietlačnice.

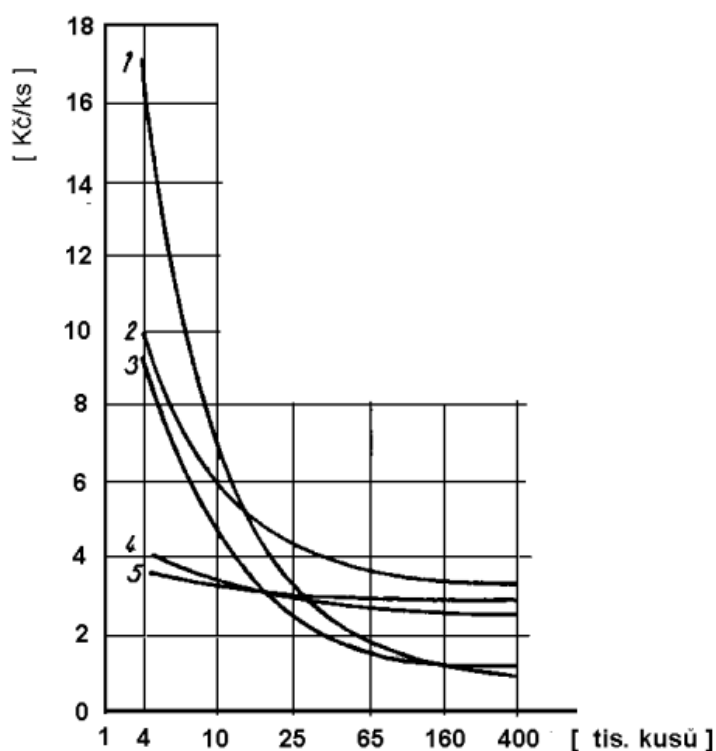
Stroj **Šmeral TPM 5** je postupový automat s otvoreným nožom na strihanie polotovaru a 4 vodorovným stanicami pre tvárniace operácie s vyrážačmi v lisovniciach uložených v stojane. Lisovníky sú uložené v barane stroja a niesu opatrené vyrážačmi. Pohon stroja je realizovaný pomocou elektromotoru cez kľukový mechanizmus s pomocou zotrvačníku. Výkon hlavného elektromotoru je **4,5 kW** a nominálna sila baranu **440 kN**. Tieto hodnoty bezpečne postačujú pre výrobu zadaného kolíku. Tabuľka 3.1 obsahuje niektoré základne parametre stroja, kompletne údaje o stroji od výrobcu sú v prílohe č.2.

Tab. 3.1 – Základné parametre stroja Šmeral TPM 5

| | | |
|------------------------------|----|----------------|
| Nominálna sila baranu | kN | 440 |
| Výkon hlavného elektromotoru | kW | 4,5 |
| Počet zdvihov baranu | - | 125 |
| Zdvih baranu | mm | 90 |
| Rozmery DxŠxV | mm | 4530x2170x1800 |
| Hmotnosť | kg | 6500 |
| Najväčšia dĺžka polotovaru | mm | 18 |
| Najväčší priemer polotovaru | mm | 8,5 |

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOTENIE [24]

Výroba súčasti objemový tvárnením prináša niekoľko výhod, ako po ekonomickej tak aj po technickej stránke. S rastúcim pretvorením v objeme súčasti rastú mechanické vlastnosti výrobku oproti mechanickým vlastnostiam materiálu. Vhodnou voľbou vstupného polotovaru a jednotlivých operácií je možné dosiahnuť rovnomerné pretvorenie v celom objeme súčasti, ktoré je pri súčastiach s hlavou a driekom žiadané. Zadaná súčasť je vyrábaná na 4 operácie objemového tvárnenia za studena, ktorým predchádza odstrihnutie polotovaru zo zvitku. Prvá operácia je nabíjanie polotovaru na optimálny východzí priemer pred ďalšie operácie. Pri veľkej sérii je táto možnosť ekonomicky výhodnejšia, než nákup polotovaru s neštandardným priemerom. Nasledujú operácie dopredného pretlačenia drieku, nabíjania hlavy a spätného pretlačenia hlavy. Hlavnými výhodami sú vysoká výrobnosť až 125 kusov za minútu a zároveň prakticky nulový materiálový odpad – objem polotovaru je rovnaký ako objem výrobku. Ďalšou výhodou výroby na postupovom tvárniacom automate je možnosť výroby zo zvitku drôtu oproti výrobe z tyčí, čas a energia na manipuláciu s materiálom sú menšie.



Obr. 4.1 (vľavo) [24]

– Graf nákladov na vyrobený kus v závislosti na objeme série a použitom stroji pre rovnakú súčasť čapového tvaru s dutinou

- 1 – Postupový tvárniaci automat
- 2 – Jednooperačný lis (32 ks/min)
- 3 – Jednooperačný lis (50 ks/min)
- 4 – Šesťvretenový obrábací automat
- 5 – Jednovretenový obrábací automat

Z grafu na obrázku 5.1 je zrejmé, že výroba na postupovom automate je v malej sérii v porovnaní s inými technológiami veľmi nevýhodná avšak stáva sa konkurencieschopnou už rádovo pri 10 000 kusovej sérii a pri hromadnej výrobe sú náklady na kus najnižšie. Trieskové obrábanie pri vyšších nákladoch na kus poskytuje relatívne stabilné náklady nezávisle na objeme vyrábanej série.

Z ekonomického hľadiska je jasné, že počiatočné náklady na výrobu objemovým tvárnením sú vyššie, nakoľko strojové aj nástrojové vybavenie sú podstatne nákladnejšie, než pri výrobe trieskovým obrábaním. Pre overenie ekonomičnosti výroby je potrebné stanoviť rovnovážny bod, teda objem výroby pri ktorom sa náklady rovnajú výnosom a všetka výroba nad týmto bodom už prináša zisk. Graf zobrazujúci rovnovážny bod je na obrázku 4.2.

Výroba objemovým tvárnením

Priame náklady na materiál

$$PN_{mat} = S \cdot C_M \cdot n = 0,0042 \times 9 \times 320000 = 12\,096 \text{ €} \quad (5.1)$$

Kde

| | | |
|----------------|---------------------|----------|
| S | spotreba materiálu | [kg/ks] |
| C _M | cena materiálu | [Eur/kg] |
| n | počet kusov v sérii | [-] |

Priame náklady na mzdy

$$t = t_a + t_b = \frac{t_{a1}}{60} + \frac{t_{b1}}{60 \cdot d_v} = \frac{0,0078}{60} + \frac{30}{60 \cdot 64000} = 0,00014 \text{ hod} \quad (4.2)$$

Kde

| | | |
|-----------------|-----------------------|-------|
| t | celkový čas na 1 ks | [hod] |
| t _{a1} | výrobný čas na 1 ks | [min] |
| t _{b1} | prípravný čas na 1 ks | [min] |
| d _v | výrobná dávka | [-] |

$$PN_{mzdy} = t \times M_t \times n = 0,00014 \times 10 \times 320000 = 448 \text{ Eur} \quad (4.3)$$

Kde

| | | |
|----------------|---------------------|-----------|
| t | celkový čas na 1 ks | [hod] |
| M _t | hodinová mzda | [Eur/hod] |
| n | počet vyrábaných ks | [-] |

Priame náklady na energie

$$PN_{en} = P \cdot V \cdot t_{A1} \cdot C_E \cdot n = 5 \times 0,8 \times 0,00013 \times 0,25 \times 320000 = 41,6 \quad (4.4)$$

Kde

| | | |
|-----------------|-------------------------------|-----------|
| P | príkon | [kW] |
| V | využitie stroja | [-] |
| C _E | cena energie | [Eur/kWh] |
| n | počet kusov vyrábanej súčasti | [-] |
| t _{A1} | výrobný čas na 1 súčasť | [hod] |

Celkové priame náklady

$$N_{pr} = PN_{mat} + PN_{mzdy} + PN_{en} = 12\,096 + 448 + 41,6 = 12\,585,6 \text{ Eur} \quad (4.5)$$

Fixné náklady – v tomto prípade náklady na nástroje, pri ktorých je uvažovaná cena 100 000 Kč na jednu tvárniacu operáciu.

$$N_f = 400000 \text{ Kč} \cong 16\,000 \text{ Eur} \quad (4.6)$$

Celkové náklady vrátane fixných nákladov

$$CN = N_{pr} + N_{fix} = 12\,585,6 + 16\,000 = 28\,585,6 \text{ Eur} \quad (4.7)$$

Celkové náklady na 1 kus

$$N_{ks} = \frac{CN}{n} = \frac{28\,585,6}{320000} = 0,9 \text{ Eur} \quad (4.8)$$

Kde

| | | |
|----|--------------------------|-------|
| CN | celkové náklady na sériu | [Eur] |
| n | počet kusov v sérii | [-] |

Započítanie zisku 100%

$$Z = \frac{CN \times z}{100} = \frac{28\,585,6 \times 100}{100} = 28\,585,6 \text{ Eur} \quad (4.9)$$

Kde

| | | |
|----|--------------------------|-------|
| CN | celkové náklady na sériu | [Eur] |
| z | zisk | [%] |

Cena za 1 kus pri zisku 100%

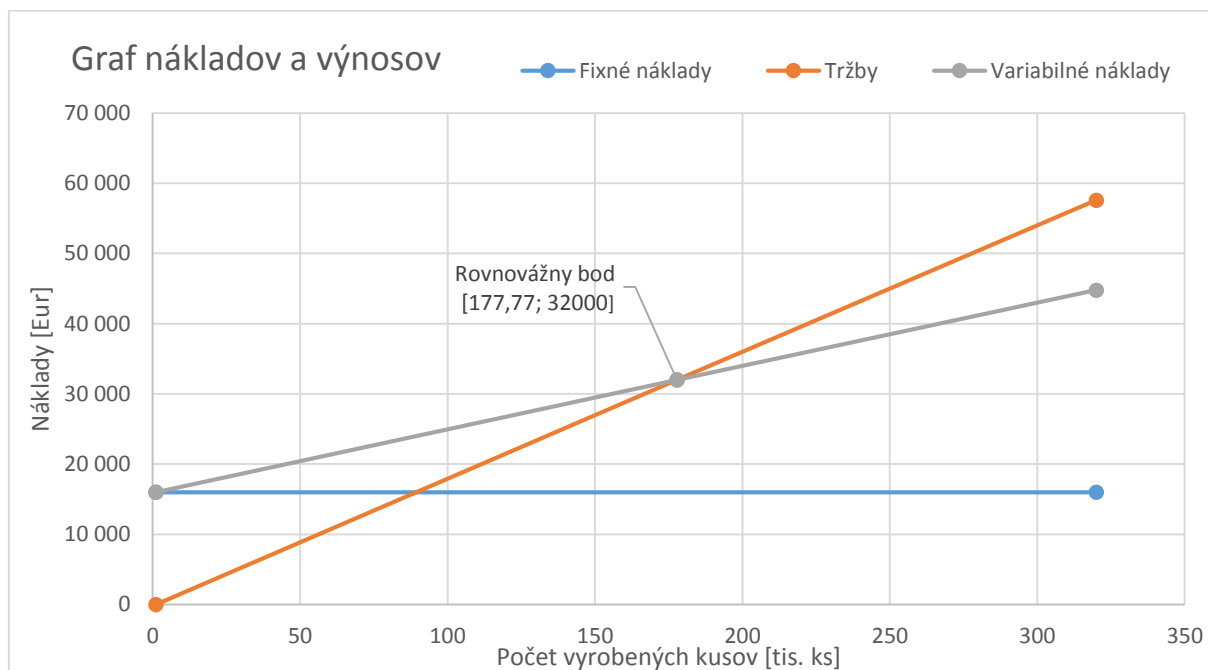
$$C_{ks} = \frac{CN + Z}{n} = \frac{28\,585,6 + 28\,585,6}{320000} = 0,18 \text{ Eur} \quad (4.10)$$

Kde

| | | |
|----|--------------------------|-------|
| CN | celkové náklady na sériu | [Eur] |
| Z | zisk | [Eur] |
| n | počet kusov v sérii | [-] |

Rovnovážny bod – vyjadruje počet kusov, ktorých predaj vygeneruje zisk potrebný na zaplatenie fixných nákladov – viz. obrázok 5.2

$$RB = \frac{N_f}{C_{ks} - N_{ks}} = \frac{16000}{0,18 - 0,09} = 177\,777 \text{ ks} \quad (4.11)$$



Obr. 4.2 – Graf nákladov a výnosov so zobrazením rovnovážneho bodu

Výroba trieskovým obrábaním

Pri výrobe obrábaním na sústruhu bol zvolený polotovár D = 8h11 o dĺžke 25 mm.

Objem polotovaru

$$V_p = \frac{\pi D^2}{4} \times l = \frac{\pi \times 8^2}{4} \times 25 = 1\,256,6 \text{ mm}^3 = 1,256 \text{ cm}^3 \quad (4.12)$$

Hmotnosť polotovaru

$$S = \rho \times V_p = 8,89 \times 1,256 = 11,2 \text{ g} \quad (4.13)$$

ρ hustota [g/cm⁻³]

Priame náklady na materiál

$$PN_{mat} = S \cdot C_M \cdot n = 0,011 \times 9 \times 320000 = 31\,680 \text{ €} \quad (4.14)$$

Kde

| | | |
|----------------|---------------------|----------|
| S | spotreba materiálu | [kg/ks] |
| C _M | cena materiálu | [Eur/kg] |
| n | počet kusov v sérii | [-] |

Priame náklady na mzdy

$$t = t_a + t_b = \frac{t_{a1}}{60} + \frac{t_{b1}}{60 \cdot d_v} = \frac{0,1}{60} + \frac{30}{60 \cdot 64000} = 0,0017 \text{ hod} \quad (4.15)$$

Kde

| | | |
|-----------------|-----------------------|-------|
| t | celkový čas na 1 ks | [hod] |
| t _{a1} | výrobný čas na 1 ks | [min] |
| t _{b1} | prípravný čas na 1 ks | [min] |
| d _v | výrobná dávka | [-] |

$$PN_{mzdy} = t \times M_t \times n = 0,0017 \times 10 \times 320000 = 5\,440 \text{ Eur} \quad (4.16)$$

Kde

| | | |
|----------------|---------------------|-----------|
| t | celkový čas na 1 ks | [hod] |
| M _t | hodinová mzda | [Eur/hod] |
| n | počet vyrábaných ks | [-] |

Priame náklady na energie

$$PN_{en} = P \cdot V \cdot t_{A1} \cdot C_E \cdot n = 10 \times 0,8 \times 0,0083 \times 0,25 \times 320000 = 5312 \text{ Eur} \quad (4.17)$$

Kde

| | | |
|-----------------|-------------------------------|-----------|
| P | príkon | [kW] |
| V | využitie stroja | [-] |
| C _E | cena energie | [Eur/kWh] |
| n | počet kusov vyrábanej súčasti | [-] |
| t _{A1} | výrobný čas na 1 súčasť | [hod] |

Celkové priame náklady

$$N_{pr} = PN_{mat} + PN_{mzdy} + PN_{en} = 31\,680 + 5\,440 + 5312 = 42\,432 \text{ Eur} \quad (4.18)$$

Porovnanie priamych nákladov „tvárnenie – obrábanie“

$$\frac{\text{obrábanie}}{\text{tvárnenie}} = \frac{42\,432}{12\,585,6} = 3,37 \quad (4.18)$$

Zhodnotenie

Po vypracovaní jednoduchého ekonomického zhodnotenia, ktoré zahŕňa najmä náklady na materiál, energie a mzdy sa ukázalo, že výroba na tvárniacom automate by bola zisková približne po prekročení polovice objemu celej série – po vyrobení 177 tisíc kusov súčasti. Taktiež boli stanovené priame náklady na výrobu trieskovým obrábaním, ktoré sú viac než trojnásobne vyššie než pri výrobe tvárnením. Pre spresnenie tohto hodnotenia sú potrebné chýbajúce údaje, ktoré je možné získať overením v konkrétnom procese výroby alebo na základe skúseností z praxe.

5 ZÁVER

Táto diplomová práca bola zameraná na vypracovanie optimálneho technologického postupu pre výrobu kolíkovej koncovky rozdelovača spalovacieho motora. Kolík je podľa výkresu vyrobený z materiálu podľa ČSN 42 3001.1 teda elektrovodná meď s obsahom kyslíku do 0,04%.

V teoretickej časti zameranej na objemové tvárnenie za studena boli zobrazené a popísané jednotlivé pochody pretlačovania a ubíjania a rôzne technologické aspekty týchto procesov, ktoré boli ďalej zohľadnené pri vypracovaní technologického postupu.

Jeden z hlavných bodov práce bola identifikácia potrebných operácií pri výrobe a ich postup. Pre porovnanie boli navrhnuté tri varianty, pričom prvé dve vychádzali z výroby súčasti z polotovaru s priemerom hlavy alebo drieku. Tieto dve varianty by mali za následok úsporu jednej operácie a teda hlavne úsporu nákladov na nástroje, avšak výsledný výrobok mal nerovnomerné pretvorenie v jednotlivých častiach a druhá varianta sa okrem toho ukázala ako nevýhodná aj z dôvodu vysokého nabíjacieho pomeru.

Tretia varianta bola navrhnutá tak, aby bolo pretvorenie v celom objeme výrobku rovnaké. Pre tento účel bol spočítaný ideálny priemer východzieho polotovaru 6,16 mm. Tento postup sa skladal z odstrihnutia materiálu, dopredného pretlačenia drieku, nabitia hlavy a spätného pretlačenia hlavy. Tento postup bol následne doplnený o nabíjanie polotovaru v prvej operácii z priemeru 6 mm na priemer 6,16 mm. Hlavný dôvod zaradenia tejto operácie bolo eliminovanie potreby nákupu polotovaru s neštandardným priemerom 6,16 mm, ktorého dodávka by mohla byť problematická.

Následne boli vypracované výkresy prietlačnice a prietlačníku pre druhú operáciu – dopredné pretlačenie drieku. Kontrolný výpočet ukázal, že prietlačnicu nieje potrebné ukladať do objímky. Taktiež bol vypracovaný zástavbový výkres pracovného priestoru stroja.

Následne boli spočítané hodnoty pretvárnej sily a práce v jednotlivých krokoch výroby. Pretvárny odpor bol určený s ohľadom na teplotu polotovaru a rýchlosť deformácie pomocou modelu podľa Johnson-Cooka. Výsledná hodnota celkovej pretvárnej sily bola spočítaná 64,5 kN a pretvárna práca 189,6 kJ a na základe týchto hodnôt bol zvolený stroj Šmeral TPM 5.

Ekonomické hodnotenie ukázalo, že výroba objemovým tvárnením za studena je pre danú súčasť omnoho výhodnejšia a v porovnaní s obrábaním sú priame náklady na materiál, mzdy a energie viac než 3 krát nižšie. Ekonomická štúdia ukazuje, že zisk bude produkovaný až po prekročení polovice výrobnéj série, teda pri cca 177 000 kusoch. Náklady na výrobu jednej súčasti sú 0,09 Eura, teda približne 2,25 Kč a potrebný čas na celú sériu dosiahne približne 42 normohodín.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] *Metals handbook*. 9th ed. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1989. ISBN 08-717-0007-7.
- [2] *Objemové tváření ocelí*. 1967. Praha: SNTL, 329 p. Řada strojírenské literatury.
- [3] BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK and Viktor TITTEL. 2010. *Technológia tvárnenia*. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 245 p. Edícia vysokoškolských učebníc.
- [4] FOREJT, Milan and Miroslav PÍŠKA. 2006. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 225 p.
- [5] KOTOUČ, Jiří, Jan ŠANOVEC, Jan ČERMÁK and Luděk MÁDLE. 1993. *Tvářecí nástroje*. Praha: České vysoké učení technické, 349 p.
- [6] ELFMARK, Jiří. 1992. *Tváření kovů*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 524 p. Technický průvodce.
- [7] KLOFÁČ, Jozef. 1982. *Tváření neželezných kovů pro 4. ročník středních průmyslových škol hutnických: učební text*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 144 p.
- [8] GRAZKA, Michal and Jacek JANISZEWSKI. 2012. Identification of Johnson-Cook Equation Constants using Finite Element Method. In: *ENGINEERING TRANSACTIONS* [online]. Warszawa, Poland: Institute of Fundamental Technological Research. Dostupné z: <http://www.entra.put.poznan.pl/index.php/et/article/viewFile/113/54>
- [9] QAMAR, S. Z. 2010/12/03. Shape Complexity, Metal Flow, and Dead Metal Zone in Cold Extrusion. *Materials and Manufacturing Processes* [online]. Taylor & Francis, **25**(12), 1454-1461. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2010.512650>
- [10] MIELNIK, Edward M. c1991. *Metalworking science and engineering*. Druhé. New York: McGraw-Hill, 976 p.
- [11] Hatebur Coldmatic AKP 4-6 S. *Hatebur* [online]. Reinach Switzerland: Hatebur Umformmaschinen, 2017 [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <http://www.hatebur.com/hatebur-en/products/coldmatic/akp-4-6s.php>
- [12] *Fujita Rashi Kougyou* [online]. [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <http://www.fjtrash.co.jp/en/process.html>
- [13] FOREJT, Milan. *Databáze materiálových modelů k predikci chování materiálů v tvářecím procesu* [online]. Brno, 2004 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/databaze_modelu.htm. Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství.
- [14] Sarkuysan ETP-Cu. *Sarkuysan* [online]. Turkey, 2017 [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <http://www.sarkuysan.com/en-EN/etpcu/174.aspx>
- [15] CuETP. *Conductivity App* [online]. 2012 [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <http://www.conductivity-app.org/alloy-sheet/33>
- [16] Copper microstructures. *Copper Development Association Inc.* [online]. 2017 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <https://www.copper.org/resources/properties/microstructure/coppers.html>

[17] LANGE, Kurt, et al. Handbook of metal forming. Kurt Lange. 1st edition. New York : McGraw-Hill Book Company, 1985. 1156 s. ISBN 0-07-036285-8.

[18] SYAHRULLAI, S., C.S.N. AZWADI, M.R. ABDUL KADI a N.E.A. SHAFIE. *The Effect of Tool Surface Roughness in Cold Work Extrusion* [online]. [cit. 2017-04-30]. DOI: 10.3923/jas.2011.367.372. ISBN 10.3923/jas.2011.367.372. ISSN 1812-5654. Dostupné z: <http://www.scialert.net/abstract/?doi=jas.2011.367.372>

[19] KLÚNA, Jindřich a Vladislav LACINA. *Tvářecí stroje*. 1. Praha, 1972, 600 s.

[20] KUBÁK, Antonín, POŠMURNÝ, Oldřich, ed. *Katalog strojních součástí*. MTZ Gotwaldov.

[21] Selecting a distributor for your application. In: *Grumpy's performance garage* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://garage.grumpysperformance.com/index.php?threads/selecting-a-distributor-for-your-application.855/>

[22] FOREJT, Milan. Konstitutivní vztahy pro rychlosti deformace v technologiích tváření. In: *The 2nd International Conference FORM'95*. 1. vyd. Brno: TU Brno, PC-DIR Co.Ltd, 1995, s. 77-82. ISBN 80-214-0664-x.

[23] MEYERS, Marc A. *Dynamic behavior of materials*. New York: Wiley, c1994. ISBN 978-0471582625.

[24] ZIDANI, M., S. MESSAOUDI, F. DENDOUGA, T. BAUDIN, C. DERFOUF, A. BOULAGROUN a M.H. MATHON. *Study of the Relation between Microstructure and Properties (Mechanical/Electrical) of Copper Wire Drawing and Annealed*. In: . Antalya, Turecko, 2012, s. 3. DOI: 10.12693/APhysPolA.123.470. ISBN 10.12693/APhysPolA.123.470. Dostupné také z: <http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/123/a123z2p103.pdf>

[25] *Měď elektrovodná 42 3001 Cu 99,9E*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1991, 28 s.

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK

| <i>Skratka</i> | <i>Jednotka</i> | <i>Veličina</i> |
|---------------------|--------------------|--|
| λ | - | Nabíjací (pechovací) pomer |
| h_0 | mm | Výška polotovaru |
| D_0 | mm | Priemer polotovaru |
| ε | - | Pomerná deformácia (pretvorenie) |
| φ | - | Logaritmická deformácia (pretvorenie) |
| L | mm | Konečná dĺžka |
| L_0 | mm | Počiatočná dĺžka |
| $\dot{\varphi}$ | s ⁻¹ | Rýchlosť deformácie |
| t | s | Čas |
| σ_0 | Mpa | Medza klzu vo vzťahu Johnson-Cook |
| B | - | Pevnostný parameter vo vzťahu Johnson-Cook |
| n | - | Exponent spevnenia vo vzťahu Johnson-Cook |
| C | - | Parameter citlivosti na rýchlosť deformácie |
| m | - | Exponent homologickej teploty |
| T^* | - | Homologická teplota |
| T_0 | K | Teplota okolia pri statickom meraní medze klzu |
| T_m | K | Teplota tavenia materiálu |
| T | K | Teplota polotovaru |
| $\dot{\varphi}_r$ | s ⁻¹ | Rýchlosť pretvorenia v radiálnom smere |
| $\dot{\varphi}_t$ | s ⁻¹ | Rýchlosť pretvorenia v tangenciálnom smere |
| $\dot{\varphi}_z$ | s ⁻¹ | Rýchlosť pretvorenia v smere osy z |
| V | mm ³ | Objem hotového výrobku |
| ρ | g.cm ⁻³ | Hustota |
| S_0 | mm ² | Obsah podstavy prístrihu |
| D_0 | mm | Priemer prístrihu |
| V_d | mm ³ | Objem driekovej časti súčasti |
| v | m.s ⁻¹ | Rýchlosť baranu |
| $\sigma_{p1,2,3,4}$ | Mpa | Pretvárný odpor v jednotlivých operáciách |
| f | - | Súčiniteľ trenia |
| $F_{1,2,3,4}$ | N | Pretvárna sila v jednotlivých operáciách |
| A_j | J.mm ⁻³ | Merná pretvárna práca |
| $A_{1,2,3,4}$ | J | Pretvárna práca v jednotlivých operáciách |
| α | ° | Polovičný vrcholový uhol prietlačnice |
| $\hat{\alpha}$ | rad | Polovičný vrcholový uhol prietlačnice |
| σ_{ps} | Mpa | Stredná hodnota pretvárneho odporu |
| $\sigma_{z1,2,3,4}$ | Mpa | Deformačný odpor v smere osy z |
| β | ° | Uhol na čele prietlačníku v 4.operácii |
| F_c | kN | Celková pretvárna sila |
| A_c | J | Celková pretvárna práca |

| | | |
|-------------|-----------------------|--|
| P_C | W | Potrebný výkon stroja |
| σ_r | Mpa | Radiálne napätie na vstupe do zásobníku v 2.operácii |
| μ | - | Poissonova konštanta |
| PN_{mat} | Eur | Priame náklady na materiál |
| S | kg | Spotreba materiálu na jednu súčasť |
| C_M | Eur.kg ⁻¹ | Cena materiálu |
| n | - | Počet kusov v sérii |
| t_{bl} | min | Prípravný čas na 1ks |
| t_{al} | min | Výrobný čas na 1ks |
| M_t | Eur.hod ⁻¹ | Hodinová mzda |
| V | - | Využitie stroja |
| C_E | Eur.kWh ⁻¹ | Cena elektrickej energie |
| PN_{mzdy} | Eur | Priame náklady na mzdy |
| PN_{en} | Eur | Priame náklady na energie |
| N_{pr} | Eur | Celkové priame náklady |
| N_f | Eur | Fixné náklady |
| CN | Eur | Celkové náklady |
| N_{ks} | Eur | Celkové náklady na 1 ks |
| z | % | Zisk |
| C_{ks} | Eur | Predajná cena za 1 ks |
| RB | ks | Rovnovážny bod |
| V_p | mm ³ | Objem polotovaru pri trieskovom obrábaní |

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha č.1 – Nekonvenčné spôsoby pretlačovania

Príloha č.2 – Parametre stroja Šmeral TPM 5 a TPM 8-A

Príloha č.3 – Materiálový list ČSN 42 3001

ZOZNAM VÝKRESOV

Výkres kolíkovej koncovky

DP-2017-145235-01

Výkres prietlačníku pre 2.operáciu

DP-2017-145235-02

Výkres prietlačnice pre 2.operáciu

DP-2017-145235-03

Zástavbový výkres pracovného priestoru

DP-2017-145235-04

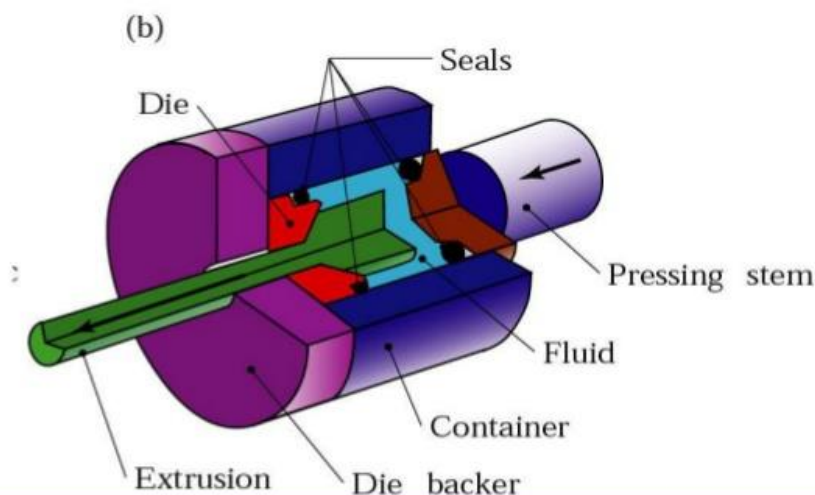
Príloha č.1 - Nekonvenčné spôsoby pretlačovania

Nekonvenčné technológie pretlačovania používajú vysokotlakú kvapalinu na prenos pretvárných síl z nástroja na výlisok. Ako kvapalnú médium sa používa voda, olej, emulzia alebo v poslednom čase aj plyny alebo taveniny kovov a zliatin s nízkou teplotou tavenia. Podľa rozsahu použitia tlakovej kvapaliny môžeme tieto procesy ďalej rozdeliť na:

- Hydrostatické
- Hydromechanické
- Pretlačovanie s protitlakom
- Hydrostatické pretlačovanie s ťahom

Manufacturing Technology

Hydrostatic Extrusion



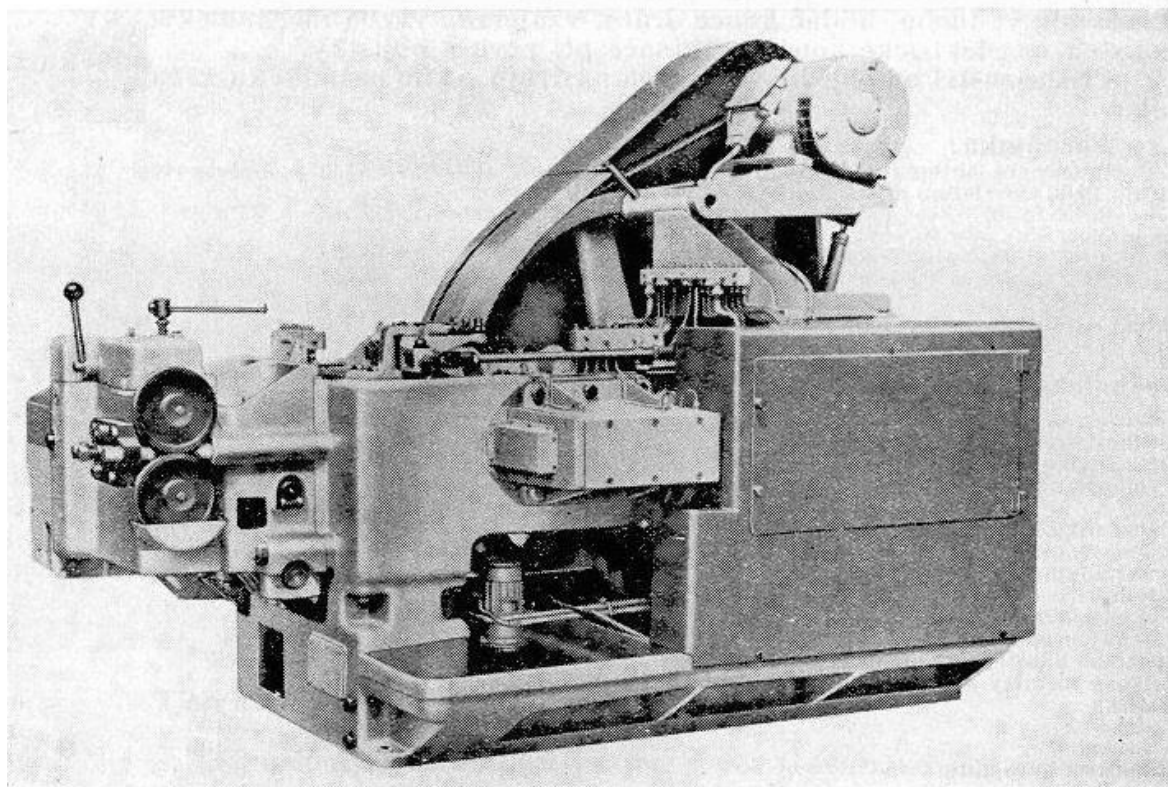
Schematic illustration Hydrostatic Extrusion process

Hydrostatické pretlačovanie spôsobuje nerovnomerný priebeh operácie vplyvom hydraulických rázov, tento problém odsraňuje hydromechanický pochod kedy je nástroj v priamom kontakte s materiálom prietlačku a kvapalina pôsobí iba po jeho bokoch kde stále vyvoláva priaznivé tlakové napätia.

Použitie kvapaliny so sebou prináša radu výhod:

- Zvýšenie tvárnosti, ktoré je spôsobené priestorovou napätosťou v tvárnenom kove
- Zníženie trenia medzi výrobkom a prietlačnicou
- Pri použití protitlaku je možné pretlačiť krehké materiály
- Zníženie pretlačovacej sily u ocelí až o 40% , u neželezných materiálov je táto redukcia menej výrazná avšak nie zanedbateľná

Postupový automat na matice **TPM 5, TPM 8-A**



TPM 8-A

Technologické určení: pro lisování polotovárů přesných šestihranných matic z kruhového drátu za studena. Jsou vhodné též pro výrobu polotovárů matic čtyřhranných, korunových a jiných podobných součástí.

Konstrukční provedení: pětistupňový, se čtyřmi vodorovnými lisovnicemi vedle sebe, u automatu TPM 5 bez obracení polotovárů mezi jednotlivými operacemi a se stříhacím ústrojím s otevřeným nožem, u TPM 8-A s obracením polotovárů a se stříhacím ústrojím s uzavřeným nožem. Lisovnice jsou uloženy v nástrojovém bloku ve stojanu a jsou opatřeny vyrážeci. Lisovnice jsou upnuty ve stavitelných držácích na beranu a jsou bez vyrážeců. Elektrická výzbroj je v samostatné skříni mimo stroj.

Uspořádání pohonu: elektromotor, klínové řemeny, setrvačnický, klikový mechanismus — beran. Setrvačnický se brzdí špalíkovou brzdou ovládanou nožní pákou. Pohon ostatních mechanismů je odvozen od vaček a výstředníků na klikovém hřídeli.

Spouštění a ovládání: elektrické — tlačítka na ovládacím panelu přímo na stroji.

Mazání: oběhové, olejem — zubovým čerpadlem s tlakovým spínačem, který zastaví stroj při poklesu maziva pod stanovenou hodnotu.

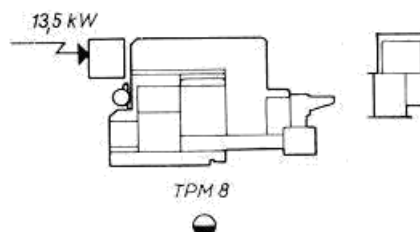
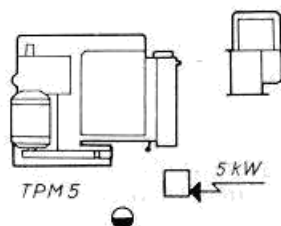
Pojistná zařízení: třecí pojistka v setrvačniku, lámací pojistky v mechanismu stříhacího a vyhazovacího ústrojí.

Příslušenství dodávané se strojem: sada nástrojů pro výrobu matic nominální velikosti, odvíjecí zařízení.

Příslušenství na objednávku: svěrací ústrojí pro přenášeči kleštiny čtvrté operace, sada nástrojů pro výrobu matic podle požadavku zákazníka, pro *TPM 8* — rovnačka drátu, pro *TPM 5* — úprava stroje pro vyrážení výlisků z lisovnic v páté operaci.

Technické údaje

| | | TPM 5 | TPM 8-A |
|-------------------------------------|----------------------|----------|----------|
| Číselný znak | 513 524 | -3500 25 | -3900 26 |
| Velikost matice | | M4-M5 | M6-M8 |
| Výchozí materiál: průměr (h9-ISA) | mm | 4,5—8,5 | 7,5—12 |
| pevnost v tahu max. | kp mm ⁻² | 50 | 50 |
| Délka ústřížku | mm | 4,5—18 | 5—17 |
| Jmenovitá síla | Mp | 45 | 100 |
| Počet zdvihů beranu — počet výlisků | za min | 125 | 100 |
| Zdvih beranu | mm | 90 | 110 |
| Zdvih vyrážeců | mm | 23 | 20 |
| Výkon elektromotoru: hlavního | kW | 4,5 | 13 |
| chladičného čerpadla | kW | 0,125 | 0,125 |
| mazacího čerpadla | kW | 0,42 | 0,42 |
| Rozměry automatů: | | | |
| délka bez odvíjecího zařízení | mm | 2 500 | 3 500 |
| délka s odvíjecím zařízením | mm | 4 530 | 5 280 |
| šířka | mm | 2 170 | 1 965 |
| výška | mm | 1 800 | 2 300 |
| Hmotnost | kg | 6 500 | 11 140 |
| Hmotnost stroje se zámořským obalem | kg | 7 000 | 12 140 |
| Objem/počet obalů | m ³ /kusů | 10/3 | 12/3 |



Výrobce: Šmeralovy závody, n. p., Brno,
závod Zastávka u Brna

Príloha č.3 – Materiálový list ČSN 42 3001

| | | |
|--------------------|-----------------------------------|-----------------|
| ČSN 42 3001 | Měď tvářená | MĚĎ |
| STN 42 3001 | pro elektrotechnické účely | Cu 99,9E |

Chemické složení [hm. %]

| | | | | | |
|----------|----------------|----------|---------|----------|--|
| Cu | O ₂ | Pb | Ag | celkem | kromě chem. složení rozhoduje rezistivita |
| min 99,9 | max 0,06 | max 0,05 | jako Cu | max 0,10 | |

Polotovary

- | | |
|--|--|
| [1] plechy, pásy, pruhy válcované za studena | [7] tyče lamelové pro elektrotech. účely tažené nebo válcované za studena |
| [2] plechy, desky, anody válcované za tepla | [8] profily pro elektrotech. účely lisované za tepla nebo tažené za studena |
| [3] dynamopásy tažené za studena | [9] trubky kruhové pro elektrotech. účely lisované za tepla nebo tažené za studena |
| [4] drát pro elektrotechnické účely tažený za studena | [10] folie válcované za studena |
| [5] trolejový drát kruhový nebo profilový tažený za studena | |
| [6] tyče kruhové, čtvercové, šestihranné a ploché pro elektrotech. účely | |

Mechanické vlastnosti

| Polotovary | [1] | | [3] | [4] | |
|--|----------------------------|----------|-------------|----------------|-----------|
| Rozměr t, d [mm] | t<10 | t<5 | ČSN 42 8308 | d<8 | d<6,65 |
| Stav | měkký | tvrdý | měkký | měkký | tvrdý |
| Mez kluzu R _p 0,2 [MPa] | – | min 245 | – | – | – |
| Mez pevnosti R _m [MPa] | max 275 | min 295 | 195–255 | min 195 | min 375 |
| Tažnost A ₅ (A ₂₀₀) [%] | – | min 4 | min 40 | (10–35) | (0,8–1,5) |
| Tvrdost HB (HV) | – | (85–110) | – | – | – |
| Modul pružnosti E [GPa] | inf. 108 | inf. 128 | inf. 108 | inf. 108 | inf. 128 |
| Polotovary | [6] | | [8] | [9] | |
| Rozměr t, d [mm] | ČSN 42 85xx ČSN 42 86xx | d<14 | d<5 | ČSN 42 8707-12 | d<14, t<4 |
| Stav | měkký | tvrdý | tvrdý | měkký | tvrdý |
| Mez kluzu R _p 0,2 [MPa] | max 108 | min 225 | min 195 | min 108 | min 215 |
| Mez pevnosti R _m [MPa] | 195–235 | min 285 | min 285 | 195–245 | min 285 |
| Tažnost A ₅ [%] | min 40 | min 6 | min 5 | min 45 | min 6 |
| Tvrdost HB (HV) | 40–65 | 80–100 | 70–100 | 40–63 | 80–100 |
| Modul pružnosti E [GPa] | inf. 108 | inf. 128 | inf. 128 | inf. 108 | inf. 128 |

Fyzikální vlastnosti

| | | | | |
|---------------------------|--|---------------------------------|---|--|
| Hustota | Měrná tepelná kapacita | Teplotní součinitel roztažnosti | Tepelná vodivost | Konduktivita |
| ρ [kg . m ⁻³] | c _p [J . kg ⁻¹ . K ⁻¹] | α [K ⁻¹] | λ _t [W . m ⁻¹ . K ⁻¹] | λ _e [MS . m ⁻¹] |
| 8 890 | 385 | 17,7 . 10 ⁻⁶ | 390 | min. 56 (58) |

Odolnost proti degradačním procesům
ODOLNOST PROTI KOROZI

dobrá proti elektrochem. korozi (+0,34V), i proti atmosférické oxidaci (měděnka); oxidace ohřevem na vzduchu; odolává neoxidujícím roztokům kyselin (HF, HCl); neodolává volnému chloru, amoniaku a sírným sloučeninám; náchylná k vodíkové křehkosti nad 0,03%O

| ODOLNOST PROTI ÚNAVĚ σ_{C10^8} [MPa] | ODOLNOST PROTI TEČENÍ R_{mT} 10 ³ /150 [MPa] | ODOLNOST PROTI KŘEHKÉMU LOMU KV _{-200 °C} [J] |
|--|--|---|
| 75–95 podle R_m | 145 ($R_m=240$) 215 ($R_m=350$) | 130 |

Technologické údaje

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

žhánání na měkko

400–650 °C

žhánání ke snížení zbytkových pnutí

150–250 °C

TVAŘITELNOST

teploty tváření: průtlačné lisování 750–950 °C

výborná za tepla i za studena

válcování a kování 800–900 °C

SVAŘITELNOST

| způsob svařování | přídavný materiál | tavidlo | tloušťka [mm] | přehřev [°C] |
|------------------|-------------------|---------|---------------|--------------|
| plamenem | G CuAg1 | – | 5–20 | 400–550 |
| TIG | ČSN 05 5461 | – | do 12 | 200–400 |

PÁJENÍ měkké i tvrdé

OBROBITELNOST

| | | | | |
|----------------------------|------|------|------|-------------|
| tvrdost HB max | 65 | 80 | 100 | ČSN 42 3213 |
| třída obrobitelnosti | 7c | 8c | 9c | 11c |
| koef. obrobitelnosti k_v | 0,40 | 0,50 | 0,63 | 1,00 |

TECHNOLOGICKÉ ZKOUŠKY

| | | | | |
|------------|----------|---------------------|-------------------|------------|
| polotovary | [3] | [4] [5] | [6] [7] | [9] |
| zkouška | ohýbáním | ohýbáním, kroucením | lomem ČSN 42 1319 | smáčknutím |

Použití

Elektrovedný materiál pro přístroje, stroje a zařízení zejména v elektrotechnice. Vyznačuje se velmi dobrou tvařitelností.

Ostatní vlastnosti

| | |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| Barevné značení podle ČSN 42 1307 | Třída odpadu podle ČSN 42 1331 |
| modrá–žlutá | 311 |

Porovnání se zahraničními materiály

| ISO | | EURO | | Německo | |
|---------|------------|----------------|-------------|-----------|-------------|
| Cu-ETP | ISO 1337 | Cu-ETP | EN 1652 | E2-Cu 58 | DIN 1708 |
| Cu-FRHC | ISO 1337 | | | E-Cu 57 | DIN 1787 |
| Francie | | Velká Británie | | Rusko | |
| Cu-a1 | NF A51-050 | C 101 | BS 2870 | Cu99,9 | GOST 859-78 |
| Cu-a2 | NF A51-050 | C 102 | BS 2870 | | |
| USA | | Japonsko | | Kanada | |
| C11000 | ASTM B 152 | C 1100 | JIS H 3100 | Cu-ETP | CSA HC.4.1 |
| Itálie | | Rakousko | | Švédsko | |
| Cu9 | – | Cu-E | ÖNORM M3401 | 5010 | SS 145010 |
| Polsko | | Maďarsko | | Norsko | |
| Cu99,9E | PN H82120 | Cu-E | – | Cu-ETP | NS 16010 |
| Finsko | | Švýcarsko | | Španělsko | |
| Cu-ETP | SFS 2908 | – | – | – | – |